

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENÉTICA**

**RESISTENCIA A FACTORES ABIÓTICOS
EN SOYA: SEQUÍA, EXCESO DE
HUMEDAD Y CALOR**

JULIO CÉSAR GARCÍA RODRÍGUEZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2014

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA EN INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENÉTICA**

**RESISTENCIA A FACTORES ABIÓTICOS
EN SOYA: SEQUÍA, EXCESO DE
HUMEDAD Y CALOR**

JULIO CÉSAR GARCÍA RODRÍGUEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2014

La presente tesis titulada "**Resistencia a factores abióticos en soya: sequía, exceso de humedad y calor**", realizada por el alumno: **Julio César García Rodríguez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

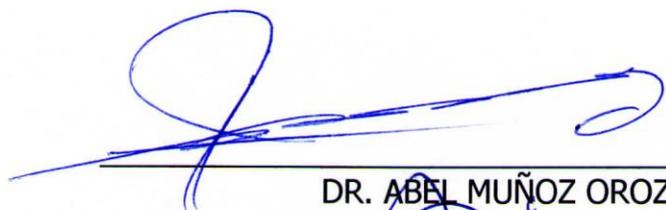
MAESTRO EN CIENCIAS

RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENETICA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



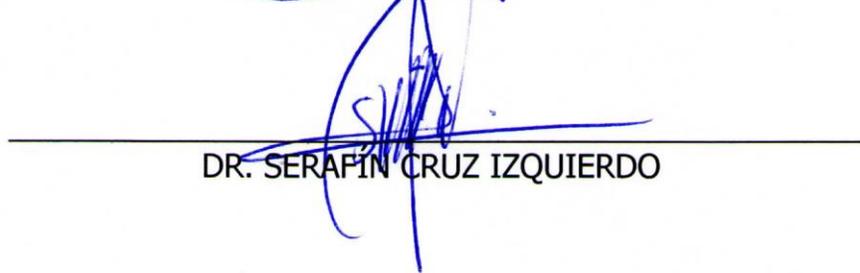
DR. ABEL MUÑOZ OROZCO

ASESOR



M.C. NICOLÁS MALDONADO MORENO

ASESOR



DR. SERAFÍN CRUZ IZQUIERDO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Octubre de 2014

RESISTENCIA A FACTORES ABIÓTICOS EN SOYA: SEQUÍA, EXCESO DE HUMEDAD Y CALOR

Julio César García Rodríguez, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2014

Resumen general

Se evaluaron características morfológicas y fisiológicas durante el crecimiento, el rendimiento y sus componentes en 25 genotipos de soya. Los efectos de la sequía y del exceso de humedad se evaluaron en el sur de Tamaulipas durante los ciclos otoño-invierno 2012-2013 y primavera-verano 2013, respectivamente. La resistencia a calor se evaluó en estado de plántula en Montecillo, Texcoco, Edo. de México. Un grupo de genotipos fue insensible a la sequía con respecto a la altura de planta, otro la redujo y un tercero la incrementó. Genotipos tardíos acumularon clorofila en sequía y los precoces la redujeron. La temperatura del dosel fue mayor en sequía a los 60 y 90 días después de la siembra. La disminución del rendimiento por sequía fue más intensa en genotipos tardíos. Mayor resistencia a sequía fue observada en: H02-2295, H98-1240, y H10-0242. La sobresaturación de humedad aumentó la altura de planta y redujo la temperatura del dosel, H10-0556 obtuvo mayores efectos genéricos en el crecimiento. Hubo genotipos insensibles al exceso de humedad en la altura de planta. H10-0242 fue el más rendidor, pero H98-1325 mantuvo el rendimiento con o sin exceso de humedad. La aplicación de 50 ± 1 °C no causó marchitamiento en las plántulas, pero se observaron diferencias en el grado de cierre de las hojas; 62 ± 1 °C provocó el mayor marchitamiento. H02-2248 mostró mayor proporción de efectos genéricos y específicos a las altas temperaturas. La variabilidad en el estudio del calor se debió en gran parte a efectos aleatorios.

Palabras clave: *Glycine max* (L.) Merr., factores abióticos adversos, resistencia genética, características morfológicas y fisiológicas.

SOYBEAN RESISTANCE TO ABIOTIC STRESS: DROUGHT, WATER EXCESS AND HEAT

Julio César García Rodríguez, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2014

Abstrac

Morphological and physiological traits were evaluated for growth and yield, and its components, in 25 soybean genotypes. The effects of drought and water excess were evaluated in southern Tamaulipas during autumn-winter 2012-2013 and spring-summer 2013 cycles, respectively. The heat resistance was evaluated at seedling stage in Montecillo, Texcoco, Edo. de Mexico. Plant height was insensitive to drought in a genotypes group; other group decreased plant height and a third group increased it. Late genotypes accumulated chlorophyll under drought and early genotypes reduced it in the same condition. The canopy temperature was higher at 60 and 90 days after planting in drought. Yield losses due drought stress were more intense in late genotypes. Best drought resistance was observed in: H02-2295, H98-1240 and H10-0242. Moisture saturation increased plant height and decreased canopy temperature, H10-0556 obtained higher generic effects on growth. There were insensitive genotypes to water excess on plant height. H10-0242 recorded the highest yield, but H98-1325 had the same yield with or without water excess. Seedlings didn't show wilting at 50 ± 1 °C application, but differences on closure of leaves degree were observed; 62 ± 1 °C caused the largest wilting. Under high temperatures, H02-2248 showed greater proportion of generic and specific effects. The variability about heat study was to random effects mainly.

Key words: *Glycine max* (L.) Merr., stress abiotic, genetic resistance, morphological and physiological traits.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por brindarme las herramientas necesarias y oportunidad de culminar una meta más en mi desarrollo profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por apoyarme con una beca para el desarrollo de mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados, por su contribución en mi formación académica a nivel de postgrado.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), por su interés y apoyo para el establecimiento y desarrollo del proyecto de investigación.

Al Fideicomiso para la Investigación del Colegio de Postgraduados, por considerar este proyecto digno de apoyo económico para realizarse.

Al Dr. Abel Muñoz Orozco, M. C. Nicolás Maldonado Moreno y Dr. Serafín Cruz Izquierdo, por su valiosa guía con sus conocimientos y experiencia en el desarrollo del presente trabajo.

Al M.C. Gerardo Arcos Cavazos, M.C. Guillermo Ascencio Luciano, el personal de campo y administrativo del Campo Experimental Las Huastecas, por brindarme las facilidades necesarias durante la etapa de campo.

Al personal directivo y administrativo del Programa de Recursos Genéticos y Productividad, por su apoyo durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados.

A mis profesores y compañeros de clase durante mi estancia en la maestría, por los momentos compartidos.

DEDICATORIA

A mi familia, el tesoro más preciado que Dios me ha regalado.

Mi esposa: María Angélica Maldonado Araujo

Mi hija: Carol Aranza García Maldonado

Mi hijo: Emmanuel Leonardo García Maldonado

A mi madre, por su apoyo incondicional en todo momento:

Adela Rodríguez Pacheco

A mi padre, por encaminarme en la senda del estudio:

José Guadalupe García García

A mis hermanos, por el apoyo que como familia siempre nos hemos brindado:

María Guadalupe, Juan Salomón, Isaías y José Manuel.

A mis abuelos: Adalberto Rodríguez y María de la Luz; Jesús García y María García.

A mis suegros: María Araujo y Javier Maldonado.

A todos mis tíos, tías, primos, primas, sobrinos, sobrinas, cuñados, cuñadas, compadres,
comadres, ahijados y ahijadas.

A mis amigos y compañeros de trabajo a lo largo de mi experiencia profesional.

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Planteamiento del problema.....	1
Objetivos.....	3
Hipótesis.....	3
Revisión de literatura.....	4
LITERATURA CITADA	8
CAPÍTULO I. RESISTENCIA A FACTORES ABIÓTICOS EN SOYA: SEQUÍA Y SU INTERACCIÓN CON GENOTIPOS Y FECHAS DE MUESTREO SOBRE EL CRECIMIENTO	13
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
MATERIALES Y MÉTODOS	15
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
Interacción de niveles de sequía por genotipos sobre la altura de planta.....	19
Interacción de fechas de muestreo por genotipos sobre la altura de planta.....	21
Interacción de niveles de sequía por genotipos sobre la clorofila.....	22
Interacción de fechas de muestreo por genotipos sobre la clorofila.....	23
Interacción de niveles de sequía por fechas de muestreo por genotipos sobre la clorofila.....	25
Interacción de niveles de sequía por fechas de muestreo sobre la temperatura del dosel.....	26
CONCLUSIONES	27
LITERATURA CITADA	28
CAPÍTULO II. RESISTENCIA A FACTORES ABIÓTICOS EN SOYA: EFECTO DE LA SEQUÍA SOBRE EL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES	32
RESUMEN	32
INTRODUCCIÓN	33
MATERIALES Y MÉTODOS	36
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37

Humedad del suelo a los 60 días después de la siembra.....	37
Efectos genéricos de la sequía sobre el rendimiento y otras características agronómicas en los genotipos precoces.....	38
Efectos genéricos de los genotipos precoces sobre el rendimiento y otras características agronómicas.....	39
Efectos específicos a sequía en genotipos precoces sobresalientes por efectos genéricos.....	40
Efectos genéricos de la sequía sobre el rendimiento y otras características agronómicas en los genotipos intermedios.....	41
Efectos genéricos de los genotipos intermedios sobre el rendimiento y otras características agronómicas.....	43
Efectos específicos a sequía en genotipos intermedios sobresalientes por efectos genéricos.....	45
Efectos genéricos de la sequía sobre el rendimiento y otras características agronómicas en los genotipos tardíos.....	45
Efectos genéricos de los genotipos tardíos sobre el rendimiento y otras características agronómicas.....	46
Efectos específicos a sequía en genotipos tardíos sobresalientes por efectos genéricos.....	48
Comparación del efecto de la sequía sobre los tres grupos de genotipos.....	49
CONCLUSIONES	50
LITERATURA CITADA	51
CAPÍTULO III. RESISTENCIA A FACTORES ABIOTICOS EN SOYA: VARIACIÓN GENOTÍPICA E INTERACCIONES BAJO CONDICIONES DE EXCESO DE HUMEDAD DURANTE SU CRECIMIENTO	55
RESUMEN	55
INTRODUCCIÓN	56
MATERIALES Y MÉTODOS	58
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
Efecto de los niveles de exceso de humedad sobre la altura de planta y temperatura del dosel.....	61
Variación genotípica sobre la altura de planta, temperatura del dosel, clorofila, marchitez y potencial hídrico.....	63
Índice de selección.....	68
Efecto de las fechas de muestreo sobre la altura de planta, temperatura del dosel, clorofila, marchitez y potencial hídrico.....	69
Interacción de niveles de exceso de humedad por genotipos sobre la altura de planta.....	70

Interacción niveles de exceso de humedad por fechas de muestreo sobre altura de planta, temperatura del dosel y potencial hídrico.....	71
Interacción fechas de muestreo por genotipos sobre altura de planta, temperatura del dosel, clorofila y marchitez.....	73
CONCLUSIONES	75
LITERATURA CITADA	76
CAPÍTULO IV. RESISTENCIA A FACTORES ABIOTICOS EN SOYA: EFECTO DEL EXCESO DE HUMEDAD SOBRE EL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES	81
RESUMEN	81
INTRODUCCIÓN	82
MATERIALES Y MÉTODOS	84
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	85
Efecto de los niveles de exceso de humedad sobre la conductancia estomática, altura a R2, peso de 100 semillas y rendimiento.....	86
Efecto del genotipo sobre el rendimiento y sus componentes, e índice de selección.....	87
Efecto de la interacción niveles de exceso de humedad por genotipos sobre las plantas cosechadas y el peso de 100 semillas.....	90
Selección de genotipos por resistencia a exceso de humedad en el suelo.....	91
CONCLUSIONES	93
LITERATURA CITADA	93
CAPÍTULO V. RESISTENCIA A FACTORES ABIOTICOS EN SOYA: RESPUESTA GENOTÍPICA AL ESTRÉS POR CALOR EN ESTADO DE PLÁNTULA	96
RESUMEN	96
INTRODUCCIÓN	97
MATERIALES Y MÉTODOS	99
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	102
Efecto del calor sobre el grado de cierre de las hojas considerando el genotipo.....	102
Efecto del calor sobre el grado de marchitamiento de las hojas considerando el genotipo y los niveles de temperatura.....	103
Selección de genotipos con mayor resistencia al calor considerando el grado de marchitez.....	105

Efecto del riego de recuperación.....	106
CONCLUSIONES	108
LITERATURA CITADA	108
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES	112
APÉNDICE	114

LISTA DE CUADROS

		Página
CAPÍTULO II		
Cuadro 1.	Efecto de la sequía sobre el rendimiento y otras características agronómicas en genotipos de soya precoces.....	38
Cuadro 2.	Efecto de los genotipos precoces en el rendimiento de soya, en sus componentes y otras variables, e índices de selección.....	40
Cuadro 3.	Efecto de la sequía sobre el rendimiento y otras características agronómicas en genotipos de soya intermedios.....	42
Cuadro 4.	Efecto de los genotipos intermedios en el rendimiento de soya, en sus componentes y otras variables, e índices de selección.....	44
Cuadro 5.	Efecto de la sequía sobre el rendimiento y otras características agronómicas en genotipos de soya tardíos.....	46
Cuadro 6.	Efectos genéricos de genotipos de soya tardíos sobre el rendimiento y otras características agronómicas e índice de selección.....	47
Cuadro 7.	Efecto de la sequía en porcentaje sobre cada una de las variables evaluadas en genotipos de soya precoces, intermedios y tardíos.....	49
CAPÍTULO III		
Cuadro 1.	Análisis de variación en características morfológicas y fisiológicas de 25 genotipos de soya evaluados bajo dos condiciones de exceso de humedad..	61
Cuadro 2.	Índice de selección en 25 genotipos de soya evaluados ignorando los niveles de exceso de humedad y las fechas de muestreo.....	68
CAPÍTULO IV		
Cuadro 1.	Análisis de variación del rendimiento y sus componentes en 25 genotipos de soya evaluados en dos niveles de exceso de humedad.....	85
Cuadro 2.	Matriz del índice de selección en 25 genotipos de soya evaluados ignorando los niveles de exceso de humedad.....	88

LISTA DE FIGURAS

		Página
CAPÍTULO I		
Figura 1.	Temperaturas máximas, mínimas y precipitación pluvial mensual acumulada de octubre de 2012 a diciembre de 2013 en el sitio de estudio	16
Figura 2.	Diferencias (S0-S1) en la altura de planta de 25 genotipos de soya ignorando las fechas de muestreo.....	19
Figura 3.	Diferencias (FM60–FM30) en la altura de planta en 25 genotipos de soya evaluados ignorando los niveles de sequía.....	21
Figura 4.	Diferencias (S0-S1) en la clorofila de 25 genotipos de soya evaluados ignorando las fechas de muestreo.....	22
Figura 5.	Diferencias (FM60-FM30) en la clorofila de 25 genotipos de soya evaluados ignorando los niveles de sequía.....	24
Figura 6.	Diferencias (FM60-FM30) en clorofila de 25 genotipos de soya evaluados considerando los niveles de sequía.....	25
Figura 7.	Interacción de niveles de sequía por fechas de muestreo sobre la temperatura del dosel de 25 genotipos de soya.....	27
CAPÍTULO II		
Figura 1.	Efecto de la interacción niveles de sequía por genotipos sobre el rendimiento de los precoces, seleccionados con base en efectos genéricos.....	41
Figura 2.	Efecto de la interacción niveles de sequía por genotipos sobre el rendimiento de los intermedios seleccionados con base en efectos genéricos.....	45
Figura 3.	Efecto de la interacción niveles de sequía por genotipos sobre el rendimiento de los tardíos seleccionados con base en efectos genéricos...	48
CAPÍTULO III		
Figura 1.	Temperaturas máximas, mínimas y precipitación pluvial mensual acumulada de octubre de 2012 a diciembre de 2013.....	59
Figura 2.	Efecto del exceso de humedad sobre la altura de planta (a) y temperatura del dosel (b) ignorando los genotipos y las fechas de muestreo	62
Figura 3.	Variación genotípica sobre la altura de planta ignorando los niveles de exceso de humedad y las fechas de muestreo.....	63
Figura 4.	Variación genotípica sobre la temperatura del dosel ignorando los niveles de exceso de humedad y fechas de muestreo.....	65
Figura 5.	Variación genotípica sobre el nivel de clorofila ignorando los niveles de exceso de humedad y las fechas de muestreo.....	66
Figura 6.	Variación genotípica sobre el grado de marchitez ignorando los niveles de exceso de humedad y las fechas de muestreo.....	67

Figura 7.	Efecto de las fechas de muestreo sobre: a) altura de planta, b) clorofila, c) potencial hídrico, d) temperatura del dosel y e) grado de marchitez, ignorando los niveles de exceso de humedad y los genotipos.....	69
Figura 8.	Diferencias (A0-A1) en la altura de planta de 25 genotipos de soya evaluados ignorando las fechas de muestreo.....	71
Figura 9.	Interacción niveles de exceso de humedad por fechas de muestreo sobre: a) la altura de planta, b) temperatura del dosel y c) potencial hídrico, ignorando los genotipos.....	72
Figura 10.	Interacción fechas de muestreo por genotipos sobre la altura de planta ignorando los niveles de exceso de humedad.....	73
Figura 11.	Interacción fechas de muestreo por genotipos sobre la clorofila ignorando los niveles de exceso de humedad.....	74
Figura 12.	Interacción fechas de muestreo por genotipos sobre el grado de marchitez ignorando los niveles de exceso de humedad.....	75

CAPÍTULO IV

Figura 1.	Efecto de los niveles de exceso de humedad sobre: a) conductancia estomática, b) altura a R2, c) peso de 100 semillas y d) rendimiento en 25 genotipos de soya.....	86
Figura 2.	Variación genotípica sobre el rendimiento ignorando los niveles de exceso de humedad.....	89
Figura 3.	Diferencias (A0-A1) en el número de plantas cosechadas en 25 genotipos de soya.....	90
Figura 4.	Diferencias (A0-A1) en el peso de 100 semillas en 25 genotipos de soya.....	91
Figura 5.	Efecto de la interacción niveles de exceso de humedad por genotipos sobre el rendimiento de los genotipos de soya seleccionados con base en mayor índice de selección.....	92

CAPÍTULO V

Figura 1.	Cámara de flujo de aire caliente diseñada para evaluar la resistencia a altas temperatura de especies vegetales en estado de plántula.....	101
Figura 2.	Grado de cierre de las hojas por efecto del calor (50 ± 1 °C) durante dos horas, en 21 genotipos de soya.....	103
Figura 3.	Efecto de tres niveles de temperatura acumulativos sobre el grado de marchitamiento de 21 genotipos de soya.....	104
Figura 4.	Grado de marchitamiento en 21 genotipos de soya sometidos a tres niveles de temperatura en etapa de plántula.....	105
Figura 5.	Interacción niveles de temperatura por genotipos sobre el grado de marchitez en genotipos de soya seleccionados por mayor proporción de efectos genéricos.....	106

Figura 6.	Efecto del riego sobre el grado de recuperación en genotipos de soya sometidos a varios tratamientos de altas temperaturas.....	107
------------------	---	-----

INTRODUCCIÓN GENERAL

Planteamiento del problema

El mercado de oleaginosas en México está dominado por la soya [*Glycine max* (L.) Merr.] y sus derivados. No obstante, anualmente se importan más de 4 millones de toneladas, ya que la producción nacional sólo satisface el 5 % de la demanda, aproximadamente. La región sur del estado de Tamaulipas es la principal productora de soya en México, donde la mayoría de la superficie es de temporal (Ascencio *et al.*, 2013); en el 2010 se sembraron 96,539 ha con una producción de 89,087 t y un rendimiento promedio de 0.9 t ha⁻¹ (SIAP, 2012)¹. En Brasil y Estados Unidos el rendimiento fue de 2.9 t ha⁻¹ en el mismo año (FAOSTAT, 2012)².

A la fecha existen cinco variedades nacionales para el trópico húmedo de México, cuyo potencial de rendimiento es de 3 a 4 t ha⁻¹. No obstante, difícilmente se expresa debido a que, además de otros factores, se enfrentan a variaciones extremas de humedad y temperatura, las cuales pueden reducir su producción hasta en 50 %.

Muñoz y García (2013)³ diseñaron y utilizaron un modelo para el análisis de información meteorológica con datos históricos, con el fin de conocer el estatus del sur de Tamaulipas en relación al cambio climático, observándose que los patrones de comportamiento en cuanto a

¹ SIAP. 2012. Portal del Servicio de Información Agrícola y Pesquera, consultado el 13 de octubre de 2012 [<http://www.siap.gob.mx/>].

² FAOSTAT. 2012. Portal de la FAO Statistical, consultado el 13 de octubre de 2012 [<http://faostat.fao.org/site/>].

³Muñoz O., A. Profesor investigador titular en el Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados (amunozo@colpos.mx); García R., J. C. Estudiante de Maestría en Genética, Colegio de Postgraduados (julio.garcia@colpos.mx).

temperatura y precipitación están cambiando. La temperatura máxima se incrementó entre 1.5 y 2 °C aproximadamente en el periodo de 1976 a 2009, en comparación con el periodo 1961-1975. Además se presentaron años atípicos donde se observaron golpes de calor por arriba de los 38 °C. Por otro lado, la sequía intraestival se está alargando, ya que el número de meses con menor precipitación durante este periodo fue mayor de 1976 a 2009 que antes de 1975, y recientemente se han observado temporales donde la cantidad de lluvia se acumula en periodos cortos de tiempo, provocando daños por hipoxia y/o anoxia en los cultivos de la región.

Lo anterior confirma la necesidad de generar genotipos resistentes a factores abióticos como sequía, exceso de humedad y calor. De acuerdo con Xoconostle *et al.* (2011), la sequía es el factor abiótico que afecta mayormente la producción mundial de cultivos y en consecuencia la de alimentos. En soya, constituye una limitante para obtener rendimientos estables en condiciones de temporal (Hufstetler *et al.*, 2007). Además, también se considera susceptible a la inundación (Bacanamwo y Purcell, 1999), sin embargo, en comparación con otras leguminosas, existen evidencias de que posee habilidades para adaptarse a suelos con exceso de humedad. Por otro lado, Allen y Boote (2000) reportaron la sensibilidad de la soya a la temperatura, crece y se desarrolla bien con temperaturas óptimas de 25 a 30 °C (Raper y Kramer, 1987; Maldonado *et al.*, 2013), pero entre los 33 y 40 °C reduce su crecimiento (Vu *et al.*, 1997).

La resistencia al estrés abiótico en especies vegetales es un proceso complejo que involucra diferencias morfológicas y fisiológicas que contribuyen a la adaptación de la planta a condiciones adversas. En México, hasta la fecha no se ha realizado mejoramiento genético enfocado a generar resistencia a factores climáticos adversos en soya. Por lo tanto, se pretende contribuir con los primeros trabajos para establecer las bases que permitan seleccionar nuevos genotipos con mejores características de resistencia a sequía, exceso de humedad y calor.

Objetivos

Los objetivos planteados para esta investigación fueron:

- General:

Establecer las bases para mejorar la resistencia de la soya a los factores abióticos: sequía, exceso de humedad y calor en las regiones con potencial en México.

- Particulares:

- 1) Detectar variabilidad genética para contrarrestar los efectos de la sequía, exceso de humedad y calor, en variedades y líneas avanzadas de soya adaptadas al sur de Tamaulipas.
- 2) Probar y precisar metodologías, tanto en campo como en invernadero, para evaluar y seleccionar los genotipos con mejores características de resistencia a factores abióticos.

Hipótesis

La hipótesis a comprobar fue:

- **H₀**: Genotipos de soya generados en México no presentan variabilidad genética para contrarrestar los efectos de factores abióticos adversos: sequía, exceso de humedad y calor.
- **H₁**: Genotipos de soya generados en México presentan variabilidad genética para contrarrestar los efectos de factores abióticos adversos: sequía, exceso de humedad y calor.

Revisión de literatura

La soya [*Glycine max* (L.) Merr.] se utiliza en Asia como alimento preparado en fresco, fermentado y deshidratado desde hace muchos siglos (Probst y Judd, 1973). De acuerdo con evidencias históricas y geográficas, Hymowitz (1970) concluyó que la soya fue domesticada en el siglo XI a. C. en el norte de China. Según Burton (1997), el grado de similitud entre la soya y su pariente silvestre más cercano (*Glycine soja*) permitió establecer al Valle del Río Amarillo como el origen más probable de la soya, punto de nacimiento de la antigua civilización China (Xu *et al.*, 1986). Tanto la soya como *G. soja* tienen $2n = 40$ cromosomas y sus cruzamientos resultan fértiles (Burton, 1997). Debido al gran número de cromosomas y a la alta frecuencia de *loci* de genes duplicados (Keim *et al.*, 1990), se piensa que la soya es un tetraploide diploidizado (Van Raamsdonk, 1995).

La soya pertenece a la familia Fabaceae, subfamilia Papilionoideae y al género *Glycine* Willd. Este género incluye al subgénero *Soja* que consta de tres especies anuales procedentes de Asia: *G. max* L. (Merr.), la soya cultivada, *G. soja* Sieb y Zucc, la forma silvestre y *G. gracilis* Skvorsov, considerada como maleza, la cual posee fenotipos intermedios a las anteriores (Blum *et al.*, 2008).

Según la descripción botánica de Kantolic *et al.* (2006), la soya presenta dos primeras hojas unifoliadas opuestas, el resto son trifoliadas dispuestas en forma alterna; a partir de algunas yemas axilares pueden desarrollarse ramas; el sistema radical está compuesto por una raíz principal pivotante, cuya profundidad exploratoria puede alcanzar los 2 m; las flores se agrupan en racimos axilares (dos a 35 flores), presentan un cáliz tubular y cinco pétalos desiguales, cuyos colores varían entre blanco y violeta; las vainas son pubescentes, levemente curvadas y miden

entre 2 y 7 cm, pueden contener de uno a cinco granos, pero generalmente presentan dos o tres, en cada racimo se pueden encontrar de dos a 20 vainas, que a la madurez presentan colores muy variados entre el amarillo claro y el marrón oscuro; las semillas son redondeadas con una coloración habitualmente amarilla; la cicatriz de la semilla (hilo), cuyos colores van desde amarillo a negro, pasando por diferentes tonalidades de marrón, es una característica que permite la identificación de los cultivares. El peso de 100 semillas en las variedades comerciales varía de 10 a 20 g (Filho *et al.*, 2007).

El cultivo de la soya es uno de los más importantes a nivel mundial, ya que el grano contiene alrededor de 20 % de aceite y 40 % de proteína, los cuales son extraídos por la industria procesadora destinándose el primero para el consumo humano y la proteína se utiliza en la formulación de alimentos balanceados para la cría y engorda de aves, cerdos y bovinos, además se emplea en una amplia gama de productos alimenticios (Maldonado *et al.*, 2013). En el 2010, el área plantada con soya a nivel mundial fue de 102.4 millones de hectáreas, con una producción total de 261.1 millones de toneladas (Souza *et al.*, 2013). Actualmente la soya se cultiva en diferentes partes del mundo, principalmente en Norteamérica, Sudamérica y Asia; Estados Unidos y Brasil son los principales países productores y exportadores (Kumudini, 2010).

De acuerdo con IPCC (1990) e IPCC (2001), los principales gases que están generando el calentamiento global denominado efecto invernadero son: bióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (NO₂), clorofluoro-carbono (CFC-23), clorofluoro-carbono-11 (CFC-11), clorofluoro-carbono-12 (CFC-12) y perfluoro-metano. El ritmo del incremento del CO₂ y de la temperatura de manera global se muestra exponencial para lo que resta del siglo XXI, lo que puede desencadenar efectos irreversibles para la población. Por otra parte, la precipitación está experimentando reducción en unas áreas y exceso en otras, las estimaciones para México en el

2050 es que la precipitación disminuirá hasta en 1 %, reduciendo el rendimiento de los cultivos en 20 % para el mismo año y 30 % para el 2080 (CGIAR, 2000).

Los informes climáticos a nivel global dan una idea de lo que está ocurriendo o puede ocurrir en promedio en el planeta o en el país; pero no necesariamente puede cumplirse a nivel de nicho o micro-región, sobre todo si se consideran los numerosos factores que determinan la mega diversidad en México. Consecuentemente es de esperarse que el cambio climático tenga múltiples formas de acuerdo a los factores determinantes en cada nicho (Muñoz, 2013)⁴, por lo tanto es de vital importancia el uso de modelos que involucren las evaluaciones y caracterizaciones *in situ*.

Numerosos reportes constatan la amplia variación genética de la soya para enfrentar la sequía. Brown *et al.* (1985) y Sneller y Dombek (1997) consideran que un cultivar es tolerante a la sequía cuando su rendimiento es significativamente más alto que el de otros en la condición de estrés, pero no en la condición sin estrés. Por otro lado, Muñoz (1992) consignó que la resistencia a sequía es la capacidad de la planta para acumular energía en contra del factor adverso, la cual puede ser medida mediante el modelo 1, que establece que la resistencia está en función de los efectos genéticos genéricos estimados por la componente G y los efectos genéticos específicos a la sequía estimados por la componente G*S. Por lo tanto, las variedades más resistentes serán las que posean mayor proporción de los dos.

Posteriormente se estableció el modelo 2 (Muñoz, 1997), considerando que la resistencia a sequía no es constante a través del ciclo de la planta, ya que si se siembran en determinada fecha

⁴ Muñoz Orozco Abel. Profesor Investigador Titular en el Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad del Colegio de Postgraduados (amunozo@colpos.mx).

genotipos precoces, intermedios y tardíos y ocurre una sequía cuando la variedad precoz está floreciendo, su respuesta no será comparable con la intermedia o con la tardía, porque la sequía no incidió en el mismo desarrollo ontogenético. Por lo tanto, el primer paso en el desarrollo de este modelo, es agrupar los genotipos de acuerdo a su desarrollo fenológico para después aplicar el modelo 1.

Dicho modelo puede ser utilizado para evaluar la resistencia a otros factores climáticos adversos como la anoxia por exceso de humedad y calor, considerando siempre el uso de por lo menos dos niveles de estrés.

La respuesta genética de la soya a la sequía ha sido uno de los temas más estudiados en el ámbito agrícola a nivel mundial, los resultados varían de acuerdo con las latitudes, la metodología y el germoplasma considerados. Ghassemi-Golezani y Lofti (2012) concluyeron que la sequía en la etapa reproductiva disminuyó las vainas planta⁻¹, granos planta⁻¹, peso de grano y rendimiento, y que la interacción cultivar por nivel de humedad no fue significativa en el rendimiento y sus componentes.

Andreeva *et al.* (1987) reportaron que la soya es más tolerante a las inundaciones que el caupí. Boru *et al.* (2003) mostraron efectos no negativos en la sobrevivencia y el verdor de la hoja, en plantas cultivadas en N₂ (gas) con O₂ no detectable por 14 días, sugiriendo que la soya es más tolerante a altos niveles de agua y baja concentración de O₂ que lo que se pensaba.

Lobell y Asner (2003) evaluaron la relación entre la variación del clima y la producción de maíz y de soya en USA entre 1982 y 1998, informando que por cada 1 °C de aumento en la temperatura, hubo una disminución promedio de 17 % en el rendimiento. Germoplasma de soya de los grupos de madurez III al VII fueron evaluados a tres niveles de potencial osmótico y cuatro

regímenes de temperatura para tolerancia a sequía y calor respectivamente, encontrándose que los daños más severos por calor se dieron durante la floración, que la susceptibilidad a dicho factor decreció hacia la madurez y que hubo gran variabilidad entre líneas en la tolerancia tanto para sequía como para temperaturas extremas, pero una no se correlacionó con la otra (Sapra y Anaele, 1991).

LITERATURA CITADA

Allen, L. H., and K. J. Boote. 2000. Crop ecosystem responses to climate change: Soybean. *In*: K. R. Reddy and H. F. Hodges (eds.). Climate change and global crop productivity. CAB International, Wallingford, UK. pp. 133–160.

Andreeva, I. N.; Svaradzh, K.; Kozlova, G. I.; Raikhman, L. A., 1987: Changes in ultrastructure and nitrogen-fixing activity of soyabean nodules under the influence of flooding. *Russ. J. Plant Physiol.* 34: 528-536.

Ascencio L., G., N. Maldonado M., J. G. García O. and H. R. Gill L. 2013. AMMI and sequential path analyses of soybean [*Glycine max.* (L.) Merrill] experimental lines in a breeding program in the Mexican tropics. *Aust. J. Crop Sci.* 7: 1772-1779.

Bacanamwo, M., and Purcell, L. C. 1999. Soybean root morphological and anatomical traits associated with acclimation to flooding. *Crop Sci.* 39: 143-149.

Blum, A. 2008. Caracterización del cultivo de soja y su complejo agroindustrial. *In*: Cárcamo, M. I. (ed.). Soja transgénica y sus impactos en Uruguay. La nueva colonización. RAP-AL Uruguay. Montevideo. pp. 7-58.

Brown E., A., Caviness C. E., and Brown D. A. 1985. Responses of selected soybean cultivars to soil moisture deficit. *Agron. J.* 77: 274-278.

Burton, J. W. 1997. Soyabean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Field Crops Res.* 53: 171-186.

CGIAR. 2000. The challenges of climate change: poor farmers at risk. Annual report. Consultative Group on International Agricultural Research. 56 p.

Filho M., M., Destro D., Miranda L. A., Spinosa W. A., Carrão-Panizzi M. C., and R. Montalván. 2007. Relationships among oil content, protein content and seed size in soybeans. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 44: 23-32.

Ghassemi-Golezani K., and R. Lotfi. 2012. Response of soybean cultivars to water stress at reproductive stages. *Int. J. Pl. An. and Env. Sci.* 2: 198-202.

Hufstetler, E. V., H. Roger B., T. E. Carter Jr., and H. J. Earl. 2007. Genotypic variation for three physiological traits affecting drought tolerance in soybean. *Crop Sci.* 47: 25–35.

Hymowitz, T. 1970. On the domestication of the soybean. *Econ. Bot.* 24: 408-421.

IPCC. 1990. Climate change. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. pp. 1-24.

IPCC. 2001. Contribution of working groups I, II and III on the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *In: Watson, R. T., and Core, W. T. (eds.). Climate change 2001: Synthesis report.* Cambridge University Press. United Kingdom and New York, USA. pp. 398.

- Kantolic, A., P. Giménez; E. de la Fuente y P. Giménez. 2006. Soja. *In*: De la Fuente, E. (ed.). Cultivos industriales. Buenos Aires, Argentina. pp. 95-141.
- Keim, P., Diers, B. W., Olson, T. C., and Shoemaker, R. C. 1990. RFLP mapping in soybean: association between marker loci and variation in quantitative traits. *Genetics* 126: 735-742.
- Kumudini, S. 2010. Soybean growth and development. *In*: Singh, B. (ed.). The soybean: botany, production and uses. CAB International. Oxfordshire, U. K. pp. 48–73.
- Lobell, D. B., and G. P. Asner. 2003. Climate and management contributions to recent trends in U.S. agricultural yields. *Science* 299: 1032.
- Maldonado M., N., G. Ascencio L., G. Espinosa V., y M. de los A. Peña del R. 2013. Estrategias tecnológicas para contrarrestar la sequía en la producción de soya en el sur de Tamaulipas. INIFAP. México. 65 p.
- Muñoz O., A. 1992. Modelo uno o de interacción genotipo por niveles de sequía y resistencia a factores adversos. *In*: Memoria del Simposio Interacción Genotipo-Ambiente en Genotecnia Vegetal. 22-27 de marzo. Sociedad Mexicana de Fitogenética, Guadalajara, Jalisco, México. pp. 261-266.
- Muñoz O., A. 1997. Model 2 to select for drought tolerance. *In*: Edmeades, G. O, M. Bänzinger, H. R. Mickelson, and C. B. Peña V. (eds). Developing drought - and low N - tolerant maize. Proceedings of a symposium. CIMMYT. México, D. F. pp. 541-543.

- Probst, A. H., and Judd, R. W. 1973. Origin, US history and development, and world distribution. *In: Caldwell, B. E. (ed.). Soybeans: Improvement, production, and uses. Agron. Mongr.* 16. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. pp. 1-5.
- Raper, C. D., and P. J. Kramer. 1987. Soybeans: Improvement, production, and uses. *In: Wilcox, J. R. (ed.). Stress physiology. Monograph 16. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.* pp. 589-641.
- Sapra, V. T., and Anaele, A. O. 1991. Screening soybean genotypes for drought and heat tolerance. *J. Agron. Crop Sci.* 167: 96-102.
- Sneller C. H., Dombek, D. 1997. Use of irrigation in selection for soybean yield potential under drought. *Crop Science* 37: 1141-1147. Souza, G. M., T. A. Catuchi, S. C. Bertoli, and R. P. Soratto. 2013. Soybean under water deficit: physiological and yield responses. *In: Board J. E. (ed). A comprehensive survey of international soybean research - Genetics, physiology, agronomy and nitrogen relationships. InTech, Croatia.* pp. 275-298.
- Van Raamsdonk, L. W. D. 1995. The cytological and genetical mechanisms of plant domestication exemplified by four crop models. *Bot. Rev.* 61: 367-399.
- Vu, J. C. V., L. H. Allen, K. J. Boote, and G. Bowes. 1997. Effects of elevated CO₂ and temperature on photosynthesis and rubisco in rice and soybean. *Plant Cell Environ.* 20: 68-76.
- Xoconostle C., B., F. A. Ramírez O., L. Flores E., and R. Ruíz M. 2011. Drought tolerance in crop plants. *Am. J. Plant Physiol.* 10: 1-16.

Xu, B., Huiyu, Z., Qinhua, L., Shuhua, Z. S. Z., and Ziang, H. 1986. Three new evidences of the original area of soybean. *Soybean Sci.* 2: 004.

CAPÍTULO I

RESISTENCIA A FACTORES ABIÓTICOS EN SOYA: SEQUÍA Y SU INTERACCIÓN CON GENOTIPOS Y FECHAS DE MUESTREO SOBRE EL CRECIMIENTO

Julio César García Rodríguez, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2014

RESUMEN

Con el cambio climático, las sequías son cada vez más severas afectando la producción mundial de soya, en México limitan la obtención de rendimientos estables bajo condiciones de temporal. El objetivo fue evaluar el efecto de la sequía en interacción con genotipos y fechas de muestreo sobre la altura de planta, temperatura del dosel y clorofila durante el crecimiento de 25 genotipos de soya. El experimento se estableció en el sur de Tamaulipas. El diseño experimental fue factorial con arreglo de parcelas divididas con dos repeticiones. Los tratamientos fueron: sin y con sequía, los cuales se diferenciaron a los 30 días después de la siembra (DDS). La unidad experimental consistió de dos surcos de 5 m. Se realizó un ANDEVA y las medias se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). La temperatura del dosel se midió a los 30, 60 y 90 DDS, y la altura de planta y clorofila a los 30 y 60 DDS. Un grupo de genotipos fue insensible a la sequía con respecto a la altura de planta, otro la redujo y un tercero la incrementó en la misma condición. Los genotipos precoces crecieron menos y los tardíos aumentaron su altura de los 30 a los 60 DDS. Los genotipos tardíos acumularon clorofila bajo sequía y los precoces la redujeron, observándose correlación significativa de las diferencias entre los niveles de sequía y los días a floración completa. A los 60 DDS hubo genotipos que aumentaron más del doble la clorofila en

sequía, en comparación con la que alcanzaron sin estrés. La temperatura del dosel fue mayor en sequía a los 60 y 90 DDS. Los genotipos evaluados mostraron respuestas diferentes en función de la sequía y las fechas de muestreo, permitiendo conocer aquéllos con mejores atributos de resistencia durante su crecimiento.

Palabras clave: *Glycine max* L. (Merr.), resistencia a sequía, caracteres morfológicos y fisiológicos, interacción genotipo-ambiente.

INTRODUCCIÓN

La soya [*Glycine max*. (L.) Merr.] es una leguminosa anual presente en la cadena alimenticia del ser humano desde hace más de 5000 años, principalmente como producto básico de la dieta asiática, donde tuvo su origen (Zhao y Gai, 2004). Su expansión comercial en México tiene poco más de 40 años (Maldonado *et al.*, 2013), ya que su introducción con fines de investigación como cultivo forrajero se inició a principios del siglo pasado. Es una planta anual cuyo ciclo vegetativo oscila de 3 a 7 meses; las hojas, los tallos y las vainas son pubescentes; la semilla es esférica, de color amarillo opaco y tamaño mediano, el peso de 100 semillas en las variedades comerciales varía de 10 a 20 g; contiene de 32 a 41 % de proteína y de 12 a 21 % de aceite (Filho *et al.*, 2007).

En México, la soya se produce principalmente en la región sur de Tamaulipas. A la fecha se han generado cinco variedades para el trópico húmedo de México, con potencial de rendimiento de 3 a 4 t ha⁻¹. No obstante, difícilmente se expresa dicho potencial debido a que, además de otros factores, se enfrentan a variaciones extremas de humedad y en años con periodos de sequía durante el ciclo de cultivo, su producción se reduce en más de 50 %.

El término sequía indica un periodo sin precipitación apreciable durante el cual el contenido de agua en el suelo se reduce (Mishra y Singh, 2010). La deficiencia de agua se traduce en una reducción del potencial hídrico de las hojas y la pérdida de turgencia celular, lo cual causa disminución de la conductancia estomática y contracción de los tejidos, restringiendo el crecimiento de la planta (Jaleel *et al.*, 2009).

De acuerdo con Xoconostle *et al.* (2011), la sequía es el factor abiótico que afecta en mayor grado la producción mundial de cultivos y en consecuencia la de alimentos. En soya es una limitante para obtener rendimientos estables en condiciones de temporal (Hufstetler *et al.*, 2007). El cambio climático causa sequías más intensas y extremas afectando, incluso, las regiones tropicales, por lo cual es necesario generar variedades de soya con alto rendimiento y resistentes a dicho factor adverso (Seversike, 2011).

En México, la sequía se debe principalmente a la errática distribución de la precipitación y pueden definirse dos tipos: la gran sequía invernal y la sequía intraestival (Muñoz *et al.*, 1998), esta última afecta a la mayoría de los cultivos sembrados en primavera-verano. Sin embargo, dicho fenómeno se presenta de manera diferente en cada región, debido a la diversidad de nichos ecológicos en México, por lo cual es importante la caracterización *in situ* de genotipos sometidos a sequía. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la sequía en interacción con genotipos y fechas de muestreo sobre la altura de planta, temperatura del dosel y clorofila durante el crecimiento de 25 genotipos de soya.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en el Campo Experimental Las Huastecas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), localizado en el km 55 de la

Carretera Tampico-Mante, municipio de Altamira, Tamaulipas, 22° 34' 11.25" N y 98° 10' 13.04" O, y a 50 msnm.

La precipitación fue de 20 mm durante el ciclo de evaluación, que abarcó de diciembre de 2012 a abril de 2013. Los promedios de temperaturas máximas y mínimas fueron de 26.8 y 15.2 °C respectivamente (Figura 1).

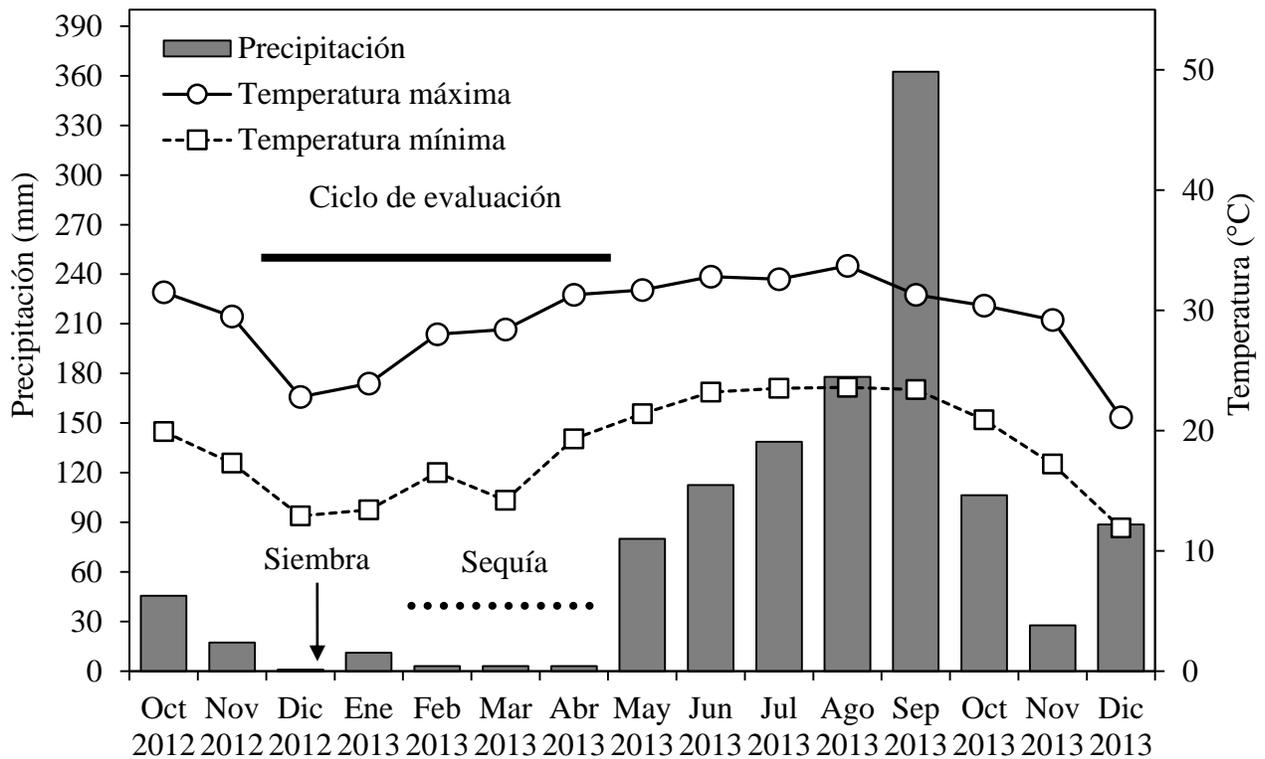


Figura 1. Temperaturas máximas, mínimas y precipitación pluvial mensual acumulada de octubre de 2012 a diciembre de 2013 en el sitio de estudio.

La Figura 1 muestra el comportamiento de las temperaturas y la precipitación a partir de octubre de 2012 y todo el 2013, con la finalidad de tener un panorama más completo del clima en el sitio de estudio. Los datos de las variables meteorológicas se obtuvieron de la estación ubicada en el Campo Experimental Las Huastecas.

La siembra se realizó el 26 de diciembre de 2012 (Figura 1). El diseño experimental fue factorial con arreglo de parcelas divididas con dos repeticiones, correspondiendo a las parcelas grandes los niveles de sequía (S) y a las subparcelas los genotipos (G); las fechas de muestreo (FM) generaron un tercer factor de variación. La unidad experimental consistió de dos surcos de 5 m. La distancia entre surcos fue de 0.76 m y la parcela útil de 6.08 m² (2 surcos de 4 m). La densidad de población fue de 250,000 plantas ha⁻¹.

Los niveles de S fueron: sin (S0) y con sequía (S1). En el nivel S1 se aplicaron cinco riegos por goteo: uno de presembrado y cuatro aproximadamente cada 8 días; a los 30 días después de la siembra (DDS) se suspendió el riego (Figura 1). El nivel S0 continuó irrigándose hasta los 100 DDS. Para el monitoreo de la humedad se colocaron dos tensiómetros, considerándose la aplicación de los riegos cuando los tensiómetros marcaban 30 cb.

El germoplasma utilizado fueron cuatro variedades generadas por el INIFAP para el trópico húmedo de México: Huasteca 200, Huasteca 300, Huasteca 400 y Tamesí; y 21 líneas avanzadas del programa de mejoramiento genético de soya del mismo Instituto: H98-1052, H02-1656, H02-2309, H02-1337, H98-1325, H98-1240, H98-1021, H02-2248, H02-2091, H02-2331, H02-2295, H02-1991, H02-1123, H02-2224, H06-0589, H06-0560, H06-1192, H06-0698, H06-1637, H10-0242 y H10-0556.

Las variables medidas fueron: altura de planta (AP), temperatura del dosel (TD) y clorofila (CL). Las determinaciones de TD se hicieron a los 30, 60 y 90 DDS (FM30, FM60 y FM90, respectivamente); se utilizó un termómetro de rayos infrarrojos (Spectrum Technologies Inc.), el cual se colocó a una distancia aproximada de 40 cm por encima del dosel del cultivo; se obtuvieron cuatro mediciones por unidad experimental y se promediaron. La AP y CL se

evaluaron a los FM30 y FM60. Para obtener los promedios en el primer caso se consideraron cinco plantas al azar y en el segundo tres hojas intermedias, ambos por parcela útil. La CL se midió con el Minolta SPAD-502 Plus (Spectrum Technologies Inc.).

Para cada genotipos se tomaron los días a R2 (floración completa), considerándose como precoces aquéllos con menos de 50 días a R2, como intermedios aquéllos cuya floración se dio entre los 50 y 59 días a R2 y como tardíos los que obtuvieron más de 59 días a R2.

Se realizó un ANDEVA y las medias se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) usando SAS 9.0. Para expresar las interacciones significativas, en el caso de S*G sobre AP y CL se calcularon las diferencias S0-S1 para cada genotipo y se asignaron al eje de las Y, graficándose contra los genotipos asignados al eje de las X. Para FM*G sobre AP y CL se calcularon las diferencias FM60-FM30 para cada genotipo, graficando en forma similar al caso anterior. Para S*FM*G en CL se calcularon las diferencias FM60-FM30 para cada genotipo en S0, asignándose al eje de las Y, y se graficaron contra los genotipos en el eje de las X (Gráfica a); luego se hizo lo propio en S1 (Gráfica b). Para conocer el grado de asociación entre variables y entre éstas y los días a R2, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido a que el efecto de las interacciones: S*G en AP y CL, FM*G en AP y CL, S*FM*G en CL y S*FM en TD resultaron altamente significativas ($p \leq 0.01$), la discusión se centra en ellas.

Interacción de niveles de sequía por genotipos sobre la altura de planta

Se observaron tres comportamientos: 1) genotipos que mantuvieron o variaron muy poco su AP al pasar de la condición S0 a la condición S1, como fue el caso de H02-1337, H98-1240, H02-2295, Huasteca 300 y H02-2224; 2) genotipos que disminuyeron su AP de S0 a S1 (valores positivos), tales como Huasteca 200, H02-1656, H06-1637, H06-0560, Tamesí, H98-1021, H02-1052, H10-0242, H02-2331, H02-2309 y H02-2091; y 3) genotipos que incrementaron su AP de S0 a S1 (valores negativos), estos fueron H06-0589, H02-1123, H06-0698, H02-1991, H10-0556, Huasteca 400, H06-1192, H02-2848 y H98-1325 (Figura 2).

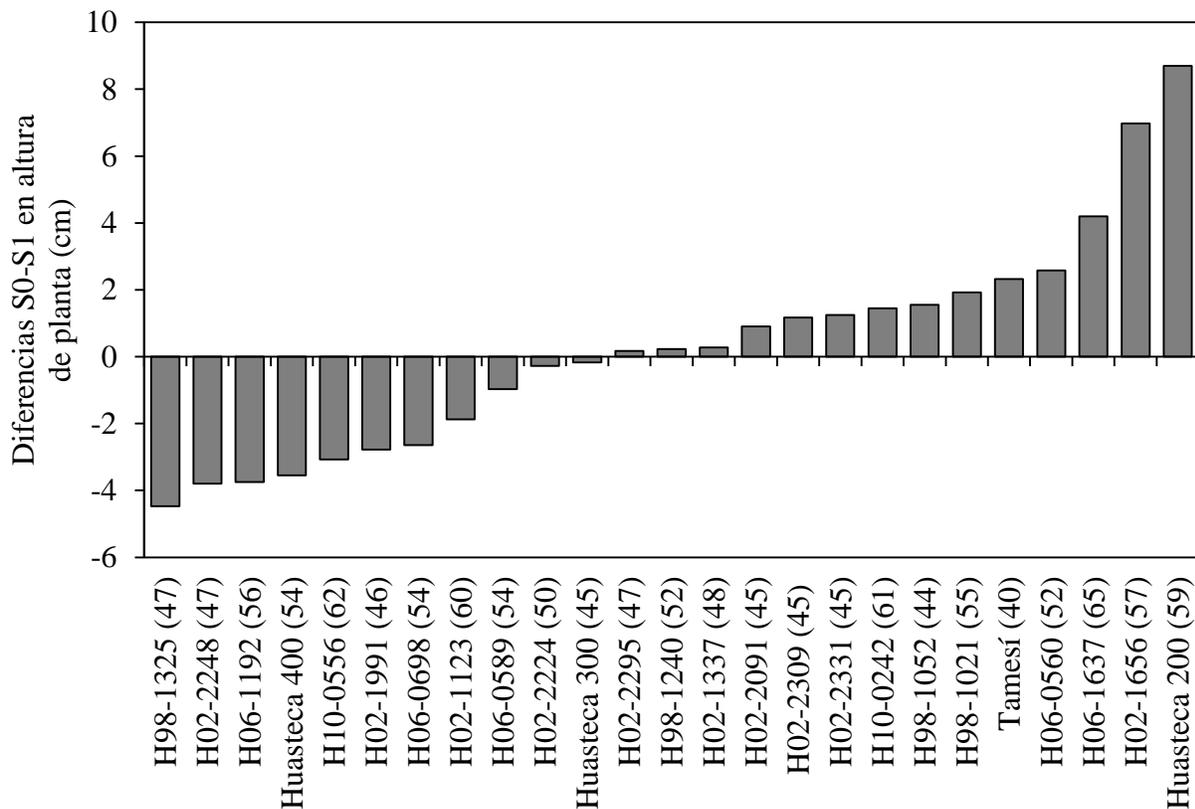


Figura 2. Diferencias (S0-S1) en la altura de planta de 25 genotipos de soya ignorando las fechas de muestreo.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

Villalobos y Camacho (1999) también encontraron interacción genotipo-ambiente altamente significativa en la AP, evaluaron diez líneas y dos variedades de soya en cuatro localidades de Costa Rica. Sin embargo, dichos autores no mencionan si el efecto fue positivo o negativo.

A diferencia de Polizel *et al.* (2011) que reportaron el mismo crecimiento con y sin déficit hídrico en plantas de soya genéticamente modificadas con el gen *rd29A:AtDREB1A*, que confiere tolerancia a sequía, y de Chinchilla *et al.* (1988) que reportaron poca influencia del estrés por sequía en la AP a R2 en 15 genotipos de soya evaluados en Colombia; el efecto positivo de S1 en el crecimiento de la soya puede atribuirse a una ligera modificación en el hábito de crecimiento de algunos genotipos en dicha condición.

La mayoría están catalogados como de hábito determinado según Maldonado (comunicación personal, 2013)⁵, la mayor parte de su crecimiento se efectúa hasta la floración. Sin embargo, la correlación entre los días a R2 y las diferencias (S0-S1) en AP no fue significativa ($r = -0.175$, $p > 0.05$), por lo tanto, las diferencias de S0 a S1 no están asociadas a su ciclo fenológico, ocurren de manera independiente.

Pero hay estudios que muestran la reducción en la AP cuando la soya es sometida a estrés por sequía. Así, Stolf *et al.* (2009) encontraron que la longitud del tallo se redujo 18 y 20 % en plantas que se expusieron a déficit de humedad por 30 y 45 días respectivamente. Jaidee *et al.*, (2013) indicaron mayor reducción en la AP de los cultivares Chiangmai 60, Thai y KKKU 74, sometidos a déficit hídrico en la etapa R1 (inicio de floración).

⁵Maldonado M., N. Líder del Programa de Investigación en Oleaginosas Anuales, CIRNE-INIFAP (maldonado.nicolas@inifap.gob.mx)

Interacción de fechas de muestreo por genotipos sobre la altura de planta

Al pasar de los FM30 a los FM60, se observó con mayor frecuencia que los genotipos precoces crecieron menos y que los tardíos tuvieron mayor incremento en AP (Figura 3). Lo cual es corroborado por el coeficiente de correlación altamente significativo ($r = 0.696$, $p \leq 0.001$) de los días a R2 con las diferencias en AP entre las FM.

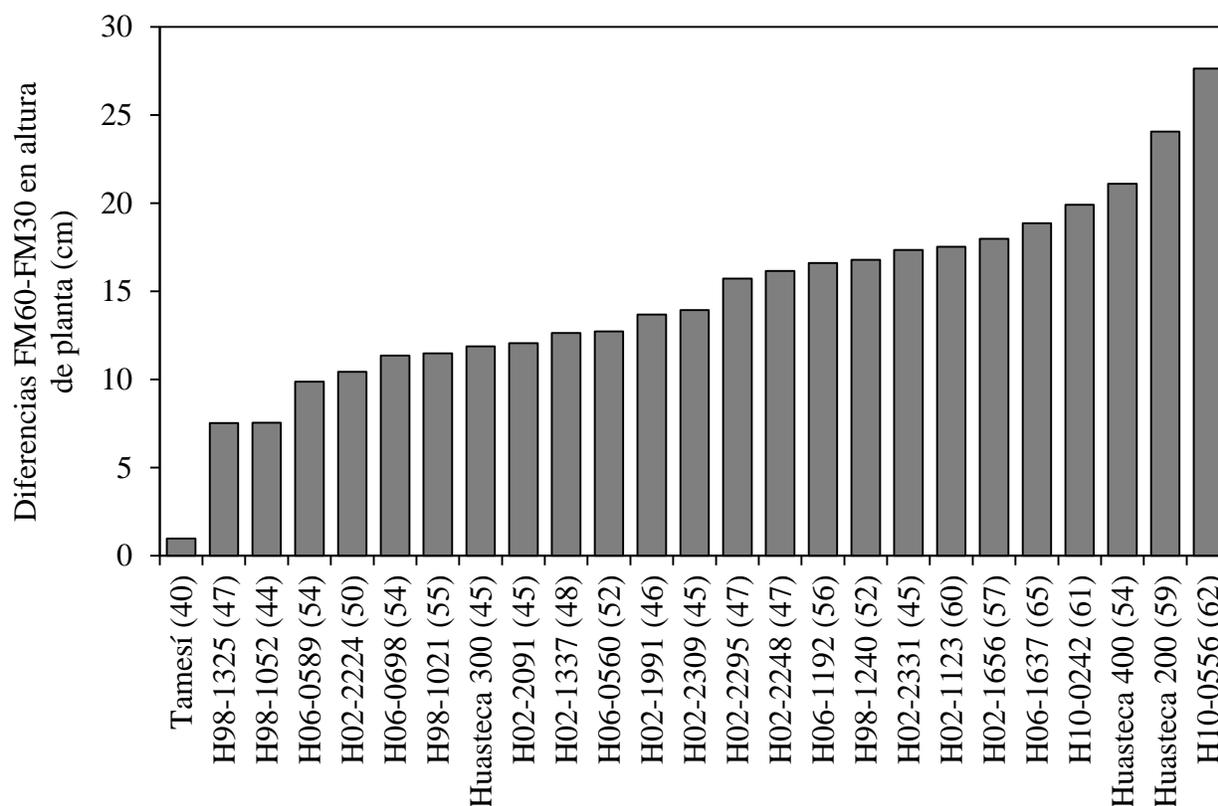


Figura 3. Diferencias (FM60–FM30) en la altura de planta en 25 genotipos de soya evaluados ignorando los niveles de sequía.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

De acuerdo con Ascencio (comunicación personal, 2013)⁶, la AP que obtuvieron los genotipos evaluados fue en general la mitad de la que obtienen en primavera-verano, esto

⁶Ascencio L. G. Investigador del Campo Experimental Las Huastecas, CIRNE-INIFAP (ascencio.guillermo@inifap.gob.mx)

debido a que la soya se considera una especie sensible al fotoperiodo corto (Maldonado y Ascencio, 2010).

Interacción de niveles de sequía por genotipos sobre la clorofila

Las diferencias de S0-S1 en cuanto a CL también mostraron: 1) genotipos con valores cercanos a cero como H98-1325, H06-0589, H06-0560, H02-2309 y H02-2248; 2) otro grupo disminuyó la CL en S1 (valores positivos), estos fueron H98-1021, H02-2091, H02-2331, H02-1991, H02-2295, H06-0698, H02-1337, Huasteca 300, H10-0242, H98-1052 y H06-1192; y 3) genotipos que la incrementaron en S1 (valores negativos), destacando H98-1240, Tamesí, H02-2224, Huasteca 200, H02-1123, H10-0556, H06-1637, H02-1656 y Huasteca 400 (Figura 4).

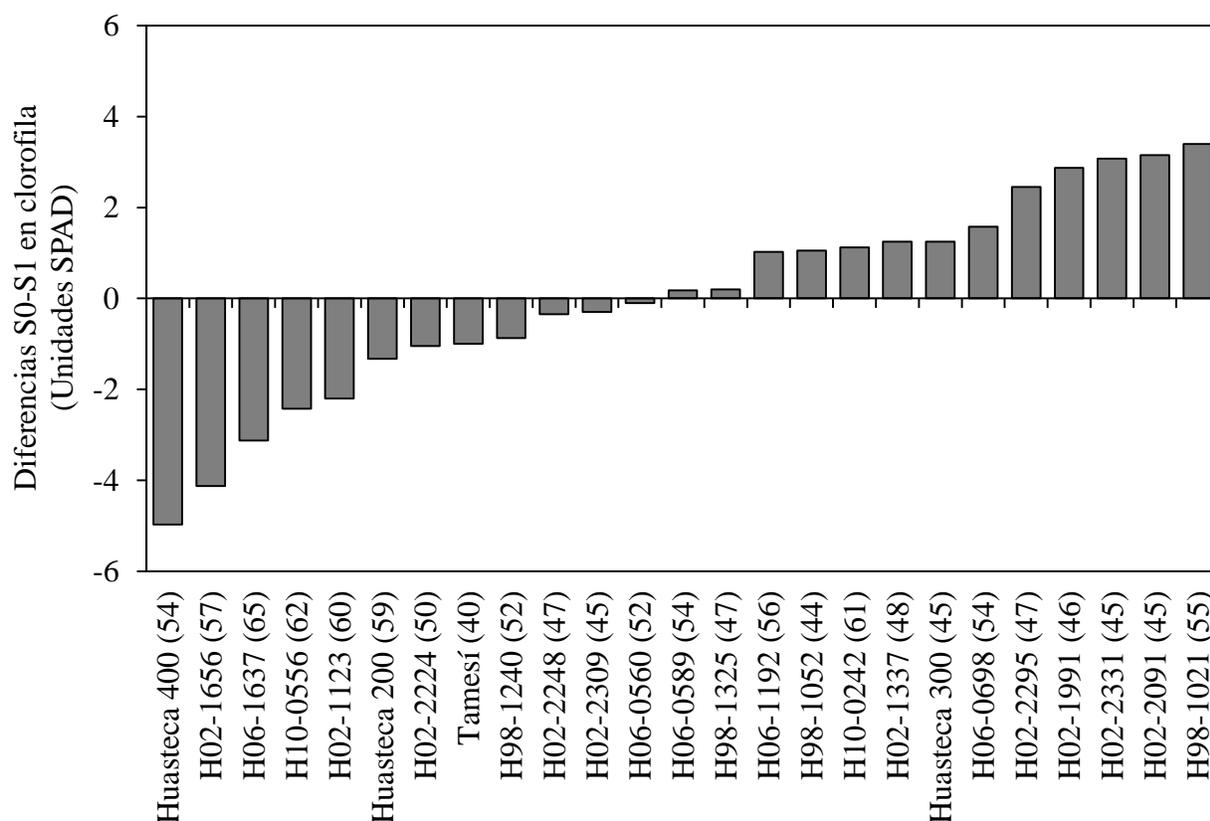


Figura 4. Diferencias (S0-S1) en la clorofila de 25 genotipos de soya evaluados ignorando las fechas de muestreo.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

A diferencia de la AP, en este caso hubo correlación negativa significativa ($r = -0.481$, $p \leq 0.05$) de las diferencias (S0-S1) en CL con los días a R2. Lo anterior indica que los genotipos más precoces redujeron la CL en S1, mientras que los genotipos más tardíos la acumularon por efecto de la sequía. La correlación de las diferencias (S0-S1) en AP y las diferencias (S0-S1) en CL no resultó significativa ($r = -0.147$, $p > 0.05$), por lo que un comportamiento no está asociado con el otro.

De acuerdo con Jagtap *et al.* (1998), la reducción del contenido de CL en condiciones de sequía es común en diferentes especies vegetales, principalmente en gramíneas. En leguminosas, varios autores reportaron la acumulación de CL como un mecanismo de resistencia al estrés, explicado por la reacción de las plantas para enfrentar el déficit de humedad, ya que concentran más cloroplastos en las células epidérmicas por la reducción del área foliar (Rosales *et al.*, 2004).

En soya, Makbul *et al.* (2011) observaron disminución del contenido de CL bajo deficiencias hídricas. Mientras que en cacahuete, Sánchez *et al.* (2006) indicaron que la intensidad del color verde fue mayor en sequía. En frijol, Nuñez *et al.* (1998) reportaron reducción de la fotosíntesis en estrés hídrico.

Interacción de fechas de muestreo por genotipos sobre la clorofila

El comportamiento entre FM indicó que los 25 genotipos registraron los niveles más altos de CL a los FM60, siendo H02-2295 el que más acumuló de una fecha a otra. Otros genotipos que también aumentaron considerablemente la CL de los FM30 a los FM60 fueron: H98-1240 y H10-0556. Los genotipos que acumularon menos CL entre las dos FM correspondieron a: H02-2224, H02-1123, H02-1337 y Tamesí (Figura 5).

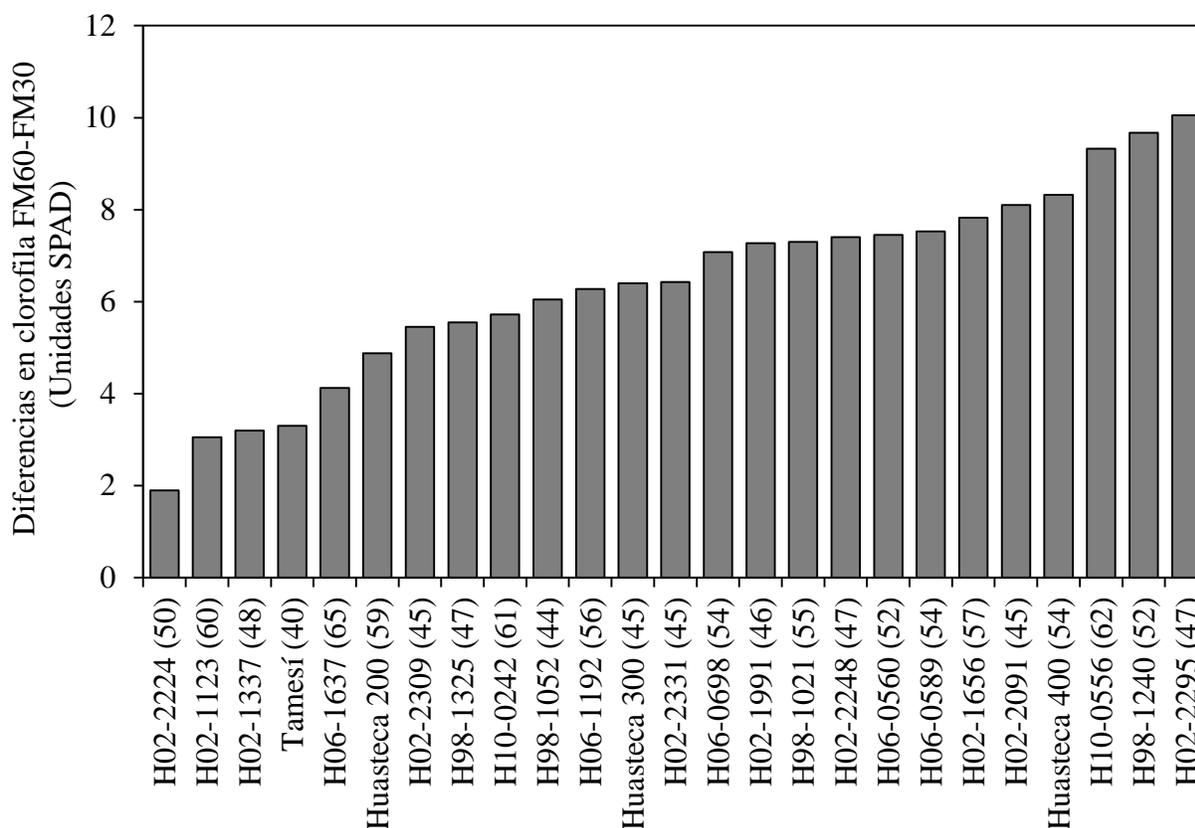


Figura 5. Diferencias (FM60-FM30) en la clorofila de 25 genotipos de soya evaluados ignorando los niveles de sequía.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

La variabilidad con respecto a la acumulación de CL entre los FM30 y los FM60 no mostró alguna tendencia en relación con los días a R2. Por lo que genotipos precoces, intermedios y tardíos se ubicaron tanto entre los que acumularon mayor cantidad de unidades SPAD, como entre los que acumularon menos. Así, la correlación de las diferencias en CL entre las dos FM con los días a R2 no resultó significativa ($r = 0.014$, $p > 0.05$), tampoco la asociación de las diferencias en CL con las diferencias en la AP ($r = 0.314$, $p > 0.05$). Lo que sugiere que los incrementos de CL son independientes de los días a R2 y de las diferencias de FM60-FM30 en AP.

Interacción de niveles de sequía por fechas de muestreo por genotipos sobre la clorofila

Tanto en S0 como en S1 la CL aumentó de los FM30 a los FM60 en la mayoría de los genotipos, a excepción de H02-1123 que la disminuyó en S0 y de H98-1021 que casi no mostró incremento en S1 (Figura 6).

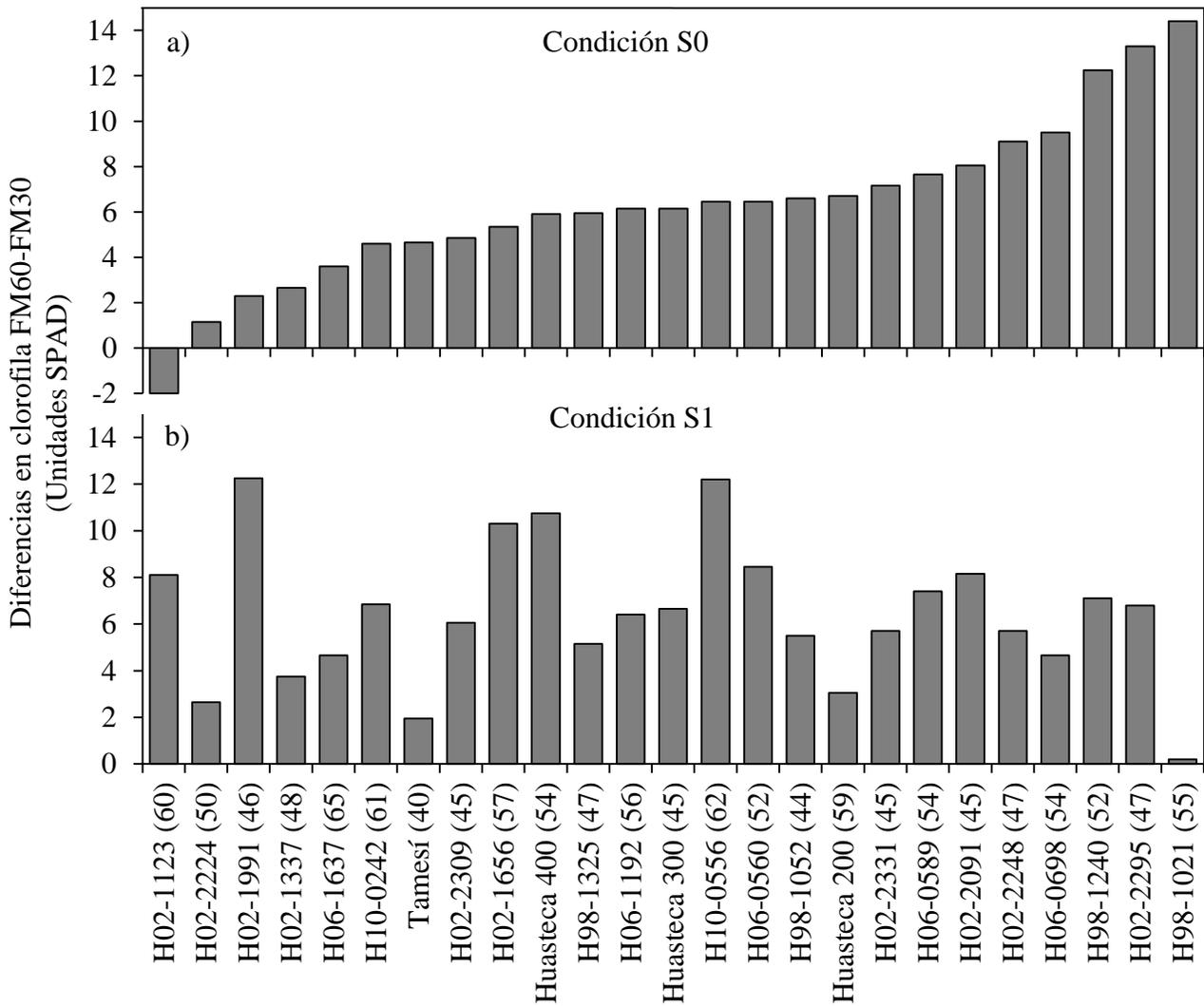


Figura 6. Diferencias (FM60-FM30) en clorofila de 25 genotipos de soja evaluados considerando los niveles de sequía.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

Pero a los FM60 hubo genotipos que concentraron más del doble de la CL en S1 que la que registraron en S0, independientemente de la precocidad, reflejando mecanismos para contrarrestar los efectos detrimentales de las deficiencias hídricas.

El efecto de la triple interacción sobre la CL confirmó la especificidad de los genotipos en el comportamiento de esta variable. Aquéllos que en S0 aumentaron considerablemente las unidades SPAD entre las dos FM fueron H98-1240, H98-1021 y H02-2295; los primeros intermedios y el último precoz. Mientras que en S1, los genotipos que sobresalieron incrementando la pigmentación verde de los FM30 a los FM60 fueron H02-1991, H02-1656, Huasteca 400 y H10-0556; el primero precoz, los siguientes intermedios y el último tardío (Figura 6).

Lo anterior se refuerza con los resultados de las correlaciones no significativas entre las variables involucradas: días a R2 con las diferencias de CL entre FM en S0 ($r = -0.125$, $p > 0.05$), con las diferencias de CL entre FM en S1 ($r = 0.173$, $p > 0.05$) y diferencias de CL entre FM en S0 con las diferencias entre FM en S1 ($r = -0.189$, $p > 0.05$).

Interacción de niveles de sequía por fechas de muestreo sobre la temperatura del dosel

Los niveles de S no se diferenciaban aún a los FM30, las plantas tenían menos follaje y todas las hojas podían recibir la misma cantidad de radiación solar, a los FM60 y a los FM90 la temperatura promedio disminuyó, registrándose mayor TD en S1 que en S0 (Figura 7). Esa menor capacidad de enfriamiento está relacionada con una menor transpiración y ésta con una menor absorción de agua. En concordancia, Houspanossian *et al.* (2007) encontraron que durante las primeras fases de desarrollo del girasol, la TD fue menor debido a la estructura del dosel y al gran porcentaje de suelo desnudo.

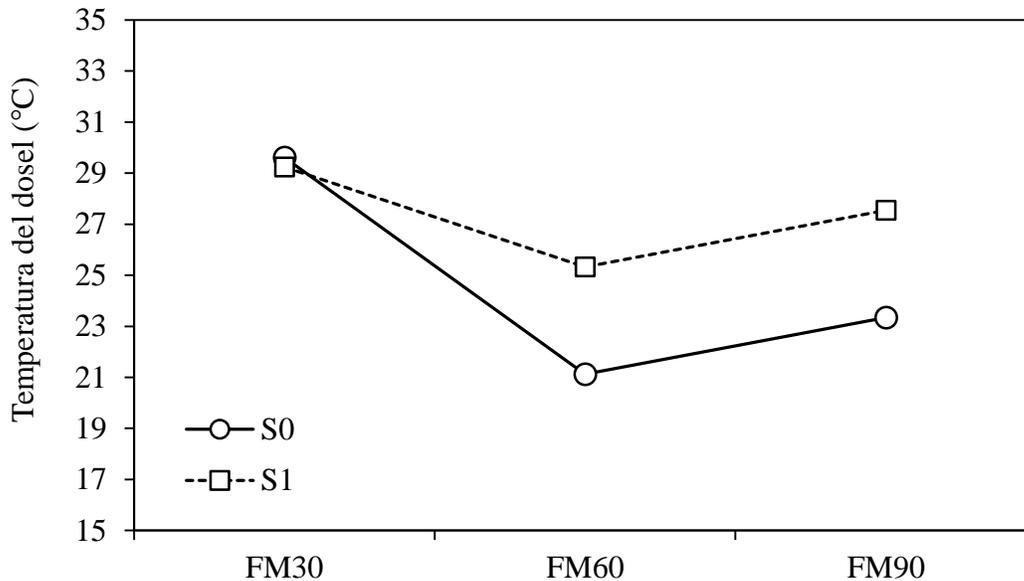


Figura 7. Interacción de niveles de sequía por fechas de muestreo sobre la temperatura del dosel de 25 genotipos de soya.

FM30 = 30 días después de la siembra (dds); FM60 = 60 dds; FM90 = 90 dds.

Por otra parte, Tzenova *et al.* (2008) reportaron que cuando las plantas crecen en condiciones normales de humedad, éstas transpiran y la superficie foliar es fresca. No obstante, bajo condiciones de sequía la temperatura se eleva. Por lo tanto, la TD puede ser utilizada como un indicador del estrés.

CONCLUSIONES

Hubo un grupo de genotipos que fue insensible a la sequía con respecto a la altura de planta, otro la redujo y un tercero la incrementó en la misma condición, atribuible a un cambio en el hábito de crecimiento. Los genotipos precoces crecieron menos y los tardíos aumentaron su altura de los 30 a los 60 días después de la siembra. Los genotipos tardíos acumularon clorofila bajo sequía y los precoces la redujeron, observándose una correlación significativa de las diferencias entre los niveles de sequía con los días a floración completa. A los 60 días después de la siembra hubo genotipos que aumentaron más del doble la clorofila en sequía, en comparación con la que

alcanzaron en la condición sin estrés, independientemente de su ciclo fenológico, reflejando mecanismos para contrarrestar los efectos detrimentales de las deficiencias hídricas. La temperatura del dosel fue mayor bajo condiciones de sequía a los 60 y 90 días después de la siembra, explicado por la reducción transpiratoria y una menor absorción de agua. Los genotipos evaluados mostraron respuestas diferentes en función de la sequía y las fechas de muestreo, permitiendo conocer aquéllos con mejores atributos de resistencia durante su crecimiento.

LITERATURA CITADA

Chinchilla R., G., P. Carrillo S., O. Agudelo D., y H. Rojas. 1988. Evaluación de variedades de soya [*Glycine max.* (L.) Merr.] con diferente hábito de crecimiento según los niveles de riego. *Acta Agron.* 38: 7-22.

Filho M., M., Destro D., Miranda L. A., Spinosa W. A., Carrão-Panizzi M. C., and R. Montalván. 2007. Relationships among oil content, protein content and seed size in soybeans. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 44: 23-32.

Houspanossian, J., J. Schirmbeck, R. Rivas, y P. Vázquez. 2007. Relación entre la temperatura radiativa de la vegetación y el contenido de agua en el suelo. *In*: Rivas R., A. Grisotto, y M. Sacido (eds). *Teledetección - Hacia un Mejor Entendimiento de la Dinámica Global y Regional*. Ed. Martin, Argentina. pp. 137-141.

Hufstetler E., V., H. Roger, T. E. Carter Jr., and H. J. Earl. 2007. Genotypic variation for three physiological traits affecting drought tolerance in soybean. *Crop Sci.* 47: 25-35.

Jagtap, V., S. Bhargava, P. Streb, and J. Feierabend. 1998. Comparative effect of water stress on photosynthetic reactions in sorghum. *J. Exp. Bot.* 49: 1715-1721.

- Jaidee, R., A. Polthanee, P. Saenjan, M. B. Kirkham, and A. Promkhambut. 2013. Pre-or post-rice soybean production with phosphorus fertilization under rainfed conditions. *Aust. J. Crop Sci.* 7: 22-31.
- Jaleel C., A., P. Manivannan, A. Wahid, M. Farooq, H. J. Al-Juburi, R. Somasundaram, and R. Panneerselvam. 2009. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *Int J. Agr. Biol.* 11: 100-105.
- Makbul, S., N. S. Güler, N. Durmuş, and S. Güven. 2011. Changes in anatomical and physiological parameters of soybean under drought stress. *Turk. J. Bot.* 35: 369-377.
- Maldonado M., N., y G. Ascencio L. 2010. Huasteca 200, variedad de soya de baja sensibilidad al fotoperiodo corto para el trópico de México. *Rev. Mex. Cienc. Agr.* 1: 707-714.
- Maldonado M., N., G. Ascencio L., G. Espinosa V., y M. de los A. Peña del R. 2013. Estrategias tecnológicas para contrarrestar la sequía en la producción de soya en el sur de Tamaulipas. INIFAP. 65 p.
- Mishra A., K., and Singh, V. P. 2010. A review of drought concepts. *J. Hydrol.* 391: 202-216.
- Muñoz O., A., J. L. Jaramillo V., y R. Barraza M. 1998. Evaluación de los efectos de la sequía que se presentó en México en 1998. I. Primer análisis. *In: V Reunión Nacional sobre Sistemas de Captación de Lluvia.* 26-28 de octubre. Oaxaca, Oax., México. pp. 20-24.
- Núñez B., A., J. Rotchie, y A. J. M. Smuker. 1998. El efecto de sequía en el crecimiento, la fotosíntesis y la intercepción de luz en frijol común. *Agron. Mesoam.* 9: 1-8.

- Polizel A., M., M. E. Medri, K. Nakashima, N. Yamanaka, J. R. B. Farias, M. C. N. de Oliveira, R. R. R. Marin, R. V. Abdelnoor, F. C. Marcelino-Guimarães, R. Fuganti, F. A. Rodrigues, R. Stolf-Moreira, M. A. Beneventi, N. Neumaier, K. Yamaguchi-Shinozaki, J. F. C. Carvalho, A. A. P. Rolla, and A. L. Nepomuceno. 2011. Molecular, anatomical and physiological properties of a genetically modified soybean line transformed with *rd29A:AtDREB1A* for the improvement of drought tolerance. *Genet. Mol. Res.* 10: 3641–3656.
- Rosales S., R., Kohashi S. J., Acosta G. J. A., Trejo L. C., Ortiz C. J., and Kelly J. M. 2004. Biomass distribution, maturity acceleration and yield in droughtstressed common bean cultivars. *Field Crop Res.* 85: 203-21.
- Sánchez D., S., A. Muñoz O., y V. A. González H. 2006. Evaluación de la resistencia a sequía de variedades de cacahuate (*Arachis hypogaea* L.) de hábito de crecimiento rastrero y erecto. *Rev. Chapingo Ser. Hort.* 12: 77-84.
- Seversike, T. M. 2011. Drought tolerance mechanisms in cultivated and wild soybean species. Ph. D. Thesis. North Carolina State University. Raleigh, North Carolina. 102 p.
- Stolf, R., M. E. Medri, J. A. Pimenta, M. R. Torres B., J. Dias, N. Giacomini L., M. C. N. de Oliveira, R. L. Brogin, N. Yamanaka, N. Neumaier, J. R. Bouça F., and A. L. Nepomuceno. 2009. Morpho-anatomical and micromorphometrical evaluations in soybean genotypes during water stress. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 52: 1321-1331.

Tzenova, V., Y. Kirkova, and G. Stoimenov. 2008. Methods for plant water stress evaluation of soybean canopy. *In*: Balwois 2008, Water Observation and Information System for Decision Support. 27-31 de mayo. Ohrid, Republic of Macedonia. pp. 1-11.

Villalobos, E., y F. Camacho. 1999. Avances en el mejoramiento genético de la soya en Costa Rica. II. CIGRAS-06 y CIGRAS-10, dos nuevas variedades tropicales. *Agron. Costarricense* 23: 61-67.

Xoconostle C., B., F. A. Ramírez O., L. Flores E., and R. Ruíz M. 2011. Drought tolerance in crop plants. *Am. J. Plant Physiol.* 10: 1-16.

Zhao T., J., and J. Y. Gai. 2004. The origin and evolution of cultivated soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. *Sci. Agric. Sinica* 37: 954-962.

CAPÍTULO II

RESISTENCIA A FACTORES ABIÓTICOS EN SOYA: EFECTO DE LA SEQUÍA

SOBRE EL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES

Julio César García Rodríguez, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2014

RESUMEN

La soya se caracteriza por su amplia variación genética para enfrentar la sequía. Para conocer el efecto de ésta durante la etapa reproductiva de la soya, se evaluaron 25 genotipos durante el ciclo otoño-invierno 2012-2013 en Altamira, Tamaulipas, considerando dos niveles de sequía. Se midió el contenido volumétrico de agua en las unidades experimentales a los 60 días después de la siembra (DDS), los días a R2 y a R7, altura de planta a R2, a R7 y a la primera vaina, índice de clorofila y conductancia estomática, ambos a los 90 DDS, plantas cosechadas, plantas m^{-1} , vainas m^{-1} , peso de 100 semillas y rendimiento. Adicionalmente se determinó un índice de selección con base en la frecuencia de los efectos genéricos. La respuesta al estrés se evaluó considerando el modelo 2 de resistencia a sequía. Las características más sensibles a la sequía fueron: índice de clorofila, conductancia estomática, vainas m^{-1} , peso de 100 semillas, que en conjunto disminuyeron el rendimiento. La sequía redujo en igual magnitud el peso de 100 semillas en los tres grupos de genotipos, sugiriendo que el efecto no está asociado con su ciclo fenológico; la disminución del rendimiento fue más intensa en los genotipos tardíos, atribuida a una reducción considerable de la clorofila, el peso de 100 semillas y la conductancia estomática en sequía. Las variaciones del agua en el suelo influenciaron el peso de 100 semillas y el rendimiento en los tres grupos de genotipos. El mayor índice de selección en los genotipos

precoces lo consiguió H02-2224, H02-2091 y H02-2295; en los intermedios fue para H02-1656 y H98-1021; y en tardíos para H02-1123, H10-0242 y H10-0556. Los genotipos con mayor resistencia a sequía fueron: H02-2295 (precoz), H98-1240 (intermedio) y H10-0242 (tardío).

Palabras clave: *Glycine max* L. (Merr.), modelo 2 de resistencia a sequía, caracteres morfológicos y fisiológicos, rendimiento y sus componentes.

INTRODUCCIÓN

La soya [*Glycine max*. (L.) Merr.] no sólo es importante por ser la fuente principal de aceite vegetal y proteína, sino porque estudios oncológicos demuestran que puede prevenir el cáncer si se incorpora en la alimentación humana. Kennedy (1995) reportó los siguientes supresores de la carcinogénesis en la composición de la soya: inhibidor de la proteasa, inhibidor de Bowman-Birk, inositol hexafosfato (ácido fítico) y beta esterol-sitosterol; concluyendo que las evidencias sugieren que las dietas con productos derivados de la soya, se asocian con bajas tasas de mortalidad por cáncer, particularmente de colon, mama y próstata.

En México, los principales estados productores de soya son: Tamaulipas, San Luis Potosí, Veracruz, Chiapas y Campeche, que en conjunto participaron con 140,000 ha sembradas durante el 2012, destacando Tamaulipas como el que mayor superficie aportó para la siembra con más de 80,000 ha; mientras tanto, Sonora, después de haber abandonado el cultivo por la incidencia de la mosquita blanca hace algunas décadas, actualmente está retomando el cultivo y participó con poco más de 1,000 ha sembradas durante el mismo año (SIAP, 2014)⁷. No obstante, Maldonado *et al.* (2013) mencionaron que durante el 2011, en el sur de Tamaulipas se cosecharon

⁷ Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Portal electrónico consultado el 11 de julio de 2014 [<http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>]

85,109 t con una producción promedio de 0.96 kg ha⁻¹. Este rendimiento se consideró bajo y fue debido a la sequía que prevaleció durante la etapa reproductiva del cultivo, ya que en años con mayor precipitación y adecuada distribución de las lluvias, el rendimiento promedio regional es superior a 1.5 t ha⁻¹.

A pesar de que la cantidad de lluvia es suficiente para el desarrollo de la soya en las regiones donde se produce, por irregularidades en la distribución se tienen periodos sin precipitación durante su crecimiento (Oya *et al.*, 2004), acentuados últimamente por el cambio climático. La reducción en el rendimiento bajo estas condiciones depende del genotipo, la etapa de desarrollo del cultivo y la severidad y duración del estrés (Maleki *et al.*, 2013), siendo la fase reproductiva: floración, formación de semillas y llenado de grano, cuando los efectos negativos de la sequía son más intensos (Liu *et al.*, 2003).

Numerosos reportes constatan la amplia variación genética de la soya para enfrentar la sequía. Así, Brown *et al.* (1985) y Sneller y Dombek (1997) consideran que un cultivar es tolerante a la sequía cuando su rendimiento es significativamente más alto que el de otros, en la condición de estrés, pero no en la condición sin estrés. Por otro lado, Muñoz (1992) consignó que la resistencia a sequía es la capacidad de la planta para acumular energía en contra del factor adverso, la cual puede ser medida mediante el modelo 1, que establece que la resistencia está en función de los efectos genéticos genéricos estimados por la componente G y los efectos genéticos específicos a la sequía estimados por la componente G*S. Por lo tanto, las variedades más resistentes serán las que posean mayor proporción de los dos. Este modelo se ha aplicado en maíz (Castañón, 2000), frijol (Acosta *et al.*, 1997), cacahuete (Sánchez *et al.*, 2006; Hernández y Muñoz, 1990), arroz (Quispe *et al.*, 1994), entre otros.

Posteriormente se estableció el modelo 2 (Muñoz, 1997), considerando que la resistencia a sequía no es constante a través del ciclo de la planta, ya que si se siembran en determinada fecha genotipos precoces, intermedios y tardíos y ocurre una sequía cuando la variedad precoz está floreciendo, su respuesta no será comparable con la intermedia o con la tardía, porque la sequía no incidió en el mismo desarrollo ontogenético. Por lo tanto, el primer paso en el desarrollo de este modelo, es agrupar los genotipos de acuerdo a su desarrollo fenológico para después aplicar el modelo 1.

La respuesta genética de la soya a la sequía ha sido uno de los temas más estudiados en el ámbito agrícola a nivel mundial, los resultados varían de acuerdo con las latitudes, la metodología y el germoplasma considerados. Ghassemi-Golezani y Lofti (2012) concluyeron que la sequía en la etapa reproductiva de la soya disminuyó las vainas planta⁻¹, granos planta⁻¹, peso de grano y rendimiento, y que la interacción cultivar por nivel de humedad no fue significativa en el rendimiento y sus componentes. Oya *et al.*, (2004) mencionaron que genotipos de soya tolerantes a sequía tuvieron una tasa de crecimiento más alta, mayor área foliar y retardaron menos su desarrollo reproductivo durante la etapa de estrés, en comparación con genotipos no tolerantes. Sloane *et al.* (1990) reportaron que el genotipo japonés PI-416937 disminuyó menos su rendimiento y mostró un marchitamiento más lento bajo condiciones de sequía. En México, Gill *et al.* (2008) identificaron genotipos de soya para derivar líneas con características de resistencia combinada, a déficit hídrico y a *Macrophomina phaseolina*, para el sur de Tamaulipas.

El objetivo de esta investigación fue conocer el efecto de la sequía, aplicada durante la etapa reproductiva, sobre el rendimiento y sus componentes en 25 genotipos de soya evaluados durante el ciclo otoño-invierno 2012-2013 en Altamira, Tamaulipas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La información referente a la localización y establecimiento del experimento, las condiciones climáticas, los niveles de S, la lista de los genotipos y las labores de manejo se consignan en el apartado “materiales y métodos” del capítulo I.

Para conocer el nivel de humedad en el suelo entre tratamientos y unidades experimentales, se midió el contenido volumétrico del agua (CVA), expresado en %, con el FieldScout TDR 300 (Spectrum Technologies Inc.) a los 60 días después de la siembra (DDS). Se tomaron lecturas de 0 a 12 cm en el lomo (LOM) y la calle (CAL) del surco. La medición en la CAL fue aproximadamente a una distancia de 38 cm a partir de la línea de plantas y la medición en el LOM fue a 0 cm a partir de la misma.

Las variables respuesta fueron: días a floración completa (DR2) y a inicio de maduración (DR7); altura de planta a floración completa (AR2), a inicio de maduración (AR7) y a la primera vaina (APV); índice de clorofila (CL90) y conductancia estomática (CE90), ambos a los 90 DDS; plantas cosechadas (PLC); plantas m^{-1} (PxM) y vainas m^{-1} (VxM); peso de 100 semillas (P100S) y rendimiento (REND). Los muestreos de CL90 y CE90 se realizaron con el Minolta SPAD-502 Plus (Spectrum Technologies Inc.) y Leaf Porometer SC-1 (Decagon Devices Inc.), respectivamente. Cabe señalar que la CL90 y la CE90 se midieron sólo en los genotipos intermedios y tardíos, ya que a los 90 DDS los precoces presentaban marchitez total y/o senescencia de hojas; las PxM y las VxM no se contabilizaron en el grupo de los tardíos.

La respuesta de los genotipos al estrés se evaluó considerando el modelo 2 de resistencia a sequía, propuesto por Muñoz (1997): $Y = R_O + R_F + R_O * R_F$, donde Y representa la variación

total, R_O la variación de la resistencia a través de las etapas ontogénicas, R_F la variación de la resistencia a través de los grupos de precocidad y $R_O * R_F$ es la interacción.

De acuerdo con lo anterior, primero se agruparon los genotipos en precoces (menos de 50 días a R2), intermedios (de 50 a 59 días a R2) y tardíos (60 y más días a R2), para después aplicar el modelo uno (Muñoz, 1992), representado por: $Y = G + S + G * S$, donde Y es la variación total, G la variación del efecto de los genotipos, S la variación del efecto de los niveles de sequía y $G * S$ la interacción.

Se efectuaron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$) para conocer el efecto de S y de G. Adicionalmente se determinó un índice de selección (IDS), de acuerdo con el procedimiento propuesto por Quispe *et al.* (1994), que consiste en sumar el número de veces en que un genotipo formó parte del grupo estadísticamente superior en las variables respuesta estudiadas; aquéllas donde no hay diferencias estadísticas no se contemplan para el IDS. También se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para conocer el grado de asociación entre las características medidas y se graficaron las interacciones del REND en los genotipos con mayor proporción de efectos genéricos (20 %), de acuerdo con el método de Muñoz (1974).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Humedad del suelo a los 60 días después de la siembra

El análisis de varianza mostró que a los 60 DDS, las diferencias de humedad sólo se presentaron entre niveles de S, el CVA en S0 promedió 49.9 % y en S1 29.6 %. Se observó que

el CVA en el LOM del surco y el CVA en la CAL del surco se correlacionaron positivamente ($r = 0.336$, $p < 0.05$).

Mientras tanto, entre las unidades experimentales asignadas a los genotipos, y entre el LOM y la CAL del surco no hubo significancia.

Efectos genéricos de la sequía sobre el rendimiento y otras características agronómicas en los genotipos precoces

El efecto de S redujo en 41.5 % el REND de la soya, lo anterior como producto de la disminución del número de PLC, de VxM y del P100S en S1 (Cuadro 1).

Cuadro 1. Efecto de la sequía sobre el rendimiento y otras características agronómicas en genotipos de soya precoces.

Nivel de sequía	AR2 (cm)	AR7 (cm)	APV (cm)	PxM (No.)	VxM (No.)	PLC (No.)	P100S (g)	REND (kg ha ⁻¹)
S0	19.9 a	29.4 a	5.5 a	22.7 a	323.0 a	173.2 a	16.1 a	1168.6 a
S1	20.0 a	29.3 a	5.6 a	22.5 a	277.1 b	166.9 b	10.7 b	683.6 b
RxS (%)	-0.50	0.34	-1.81	0.88	14.2	3.6	33.5	41.5

Medias con la misma letra entre niveles de sequía no son diferentes.

AR2 = Altura a R2; AR7 = Altura a R7; APV = Altura a primera vaina; PxM = Plantas m⁻¹; VxM = Vainas m⁻¹; PLC = Plantas cosechadas; P100S = Peso de 100 semillas; REND = Rendimiento; S0 = Sin sequía; S1 = Con sequía; RxS = Reducción por sequía [(S0-S1)/S0]*100].

De acuerdo con Desclaux *et al.* (2000), el número de vainas por unidad de materia seca vegetativa fue afectado significativamente por la sequía durante el periodo de crecimiento de éstas. También señalaron que el estrés en fase temprana del llenado de grano, redujo el número

de semillas planta⁻¹, mientras que el estrés en fase tardía provocó decremento en el peso del grano.

Por su parte, Bowers (1995) indicó que la sequía disminuyó 30 % el REND en genotipos pertenecientes a los grupos de madurez III y IV (precoces).

Efectos genéricos de los genotipos precoces sobre el rendimiento y otras características agronómicas

En cuanto al efecto de G, H02-1991 alcanzó el mayor REND que fue de 1145.2 kg ha⁻¹, pero no fue estadísticamente diferente al resto de los genotipos. Además tampoco figuró entre los que obtuvieron el IDS más alto, ya que H02-2248, H02-2091 y H02-2295 fueron superiores y estadísticamente diferentes en todas las variables consideradas para el IDS (Cuadro 2).

Al correlacionar el CVA en el suelo con las variables medidas en los genotipos, se observaron asociaciones positivas con VxM ($r = 0.393$, $p < 0.01$), P100S ($r = 0.719$, $p < 0.0001$) y REND ($r = 0.665$, $p < 0.001$).

Las variables que más se correlacionaron con REND fueron: AR7 ($r = 0.435$, $p < 0.01$), PLC ($r = 0.339$, $p < 0.05$), VxM ($r = 0.747$, $p < 0.0001$) y P100S ($r = 0.489$, $p < 0.001$).

Otras variables que también se correlacionaron positivamente fueron: AR2 y VxM ($r = 0.345$, $p < 0.05$), AR2 y AR7 ($p = 0.286$, $p \leq 0.05$), AR7 y VxM ($r = 0.417$, $p < 0.01$); mientras que APV y VxM tuvieron una correlación negativa ($r = -0.420$, $p < 0.01$), o sea que a menor APV mayor es la cantidad de VxM.

Cuadro 2. Efecto de los genotipos precoces en el rendimiento de soya, en sus componentes y otras variables, e índices de selección.

Genotipo	AR2 (cm)	AR7 (cm)	APV (cm)	PxM (No.)	VxM (No.)	PLC (No.)	P100S (g)	REND (kg ha ⁻¹)	IDS
G1	17.3 cd	22.6bc	5.7ab	23.0a	315.3a	171.7ab	10.8c	926.0 a	2
G2	18.0bcd	30.4ab	5.4ab	21.8a	241.1a	169.0ab	13.2abc	805.9 a	4
G3	21.9abc	28.8abc	5.8ab	22.8a	271.3a	157.2b	14.8abc	838.4 a	4
G4	19.2abcd	20.3c	4.0a	22.7a	283.3a	174.2ab	15.4ab	662.7 a	4
G5	22.7 ab	31.0ab	7.1b	21.3a	260.0a	176.2a	13.0abc	812.6 a	4
G6	23.7 a	31.9ab	5.1ab	22.0a	362.6a	171.5ab	12.9abc	1050.2 a	5
G7	19.6abcd	34.8a	5.8ab	23.7a	338.3a	167.0ab	13.9abc	1010.2 a	5
G8	18.2bcd	30.7ab	4.9ab	22.6a	299.6a	163.2ab	13.1abc	1040.7 a	4
G9	23.0 a	31.8ab	5.1ab	21.7a	340.8a	174.7a	13.1abc	1089.1 a	5
G10	19.1abcd	31.1ab	5.6ab	24.1a	349.3a	179.2a	11.4bc	1145.2 a	4
G11	16.8 d	29.8abc	6.8b	22.7a	239.2a	166.7ab	16.1a	806.8 a	3

Medias con la misma letra entre genotipos no son diferentes.

G1 = H98-1052; G2 = H02-2309; G3 = H02-1337; G4 = Tamesí; G5 = H98-1325; G6 = H02-2248; G7 = H02-2091; G8 = H02-2331; G9 = H02-2295; G10 = H02-1991; G11 = Huasteca 300; AR2 = Altura a R2; AR7 = Altura a R7; APV = Altura a primera vaina; PxM = Plantas m⁻¹; VxM = Vainas m⁻¹; PLC = Plantas cosechadas; P100S = Peso de 100 semillas; REND = Rendimiento; IDS = Índice de selección.

Efectos específicos a sequía en genotipos precoces sobresalientes por efectos genéricos

La Figura 1 muestra la interacción S*G de los genotipos precoces seleccionados por mayor proporción de efectos genéricos en REND.

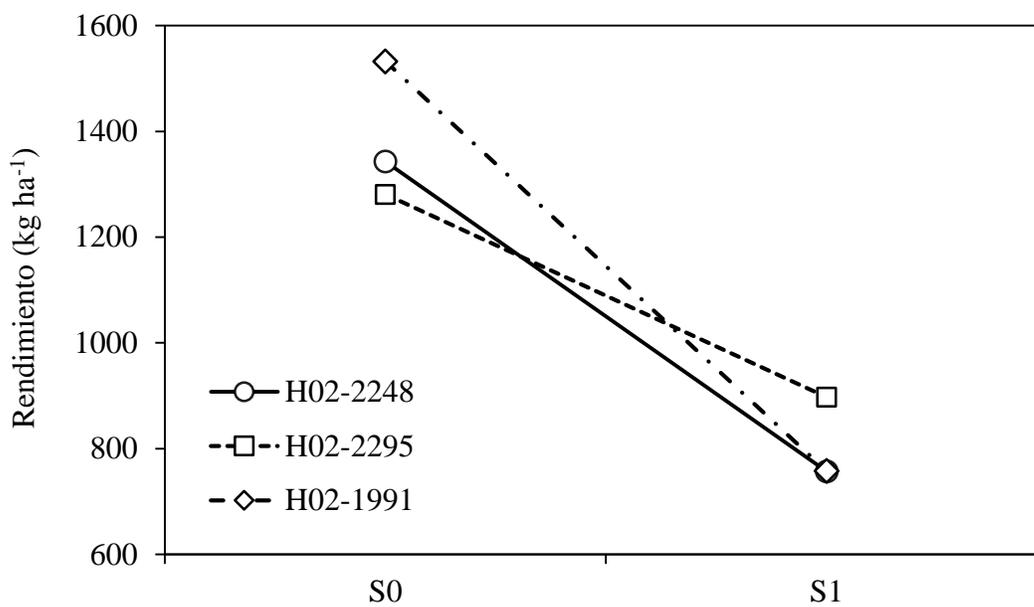


Figura 1. Efecto de la interacción niveles de sequía por genotipos sobre el rendimiento de los precoces, seleccionados con base en efectos genéricos.

S0 = Sin sequía; S1 = Con sequía.

Según el modelo 1 para evaluar resistencia a sequía (Muñoz, 1992); H02-2295 fue el genotipo que disminuyó menos su REND al pasar de S0 a S1, por lo que se infiere que posee mayor proporción de efectos genéticos específicos a sequía, que le permite mayor estabilidad con o sin déficit de agua; H02-1991, además de sobresalir por efectos genéricos, respondió mejor en el ambiente favorable pero bajó más su REND en S1, lo que significa que tiene menor proporción de efectos específicos para sequía y mayor proporción de efectos específicos para condiciones de buena humedad.

Efectos genéricos de la sequía sobre el rendimiento y otras características agronómicas en los genotipos intermedios

Según el Cuadro 3, las variables que mostraron reducciones más perceptibles por efecto de S1 en orden ascendente fueron: VxM, CL90, P100S y CE90, las cuales contribuyeron a la

reducción del REND en un 48.7 %; S1 registró los valores más bajos de CL90 disminuyéndola en 11.9 %, pero el efecto más contundente fue la reducción en la CE90 que fue de 53.2 %.

Cuadro 3. Efecto de la sequía sobre el rendimiento y otras características agronómicas en genotipos de soya intermedios.

Nivel de sequía	CL90 (U. Spad)	CE90 (Mmol m ⁻² s ⁻¹)	AR2 (cm)	AR7 (cm)	APV (cm)	PxM (No.)	VxM (No.)	PLC (No.)	P100S (g)	REND (kg ha ⁻¹)
S0	30.1a	400.7a	28.2 a	33.0a	6.4a	22.1a	360.2a	167.4a	13.7a	1307.1a
S1	26.5b	187.5b	28.1 a	34.2a	7.5b	23.2a	317.0b	170.0a	9.5 b	670.5b
RxS (%)	11.9	53.2	0.35	-3.6	-17.1	-4.9	11.9	-1.5	30.6	48.7

Medias con la misma letra entre niveles de sequía no son diferentes.

CL90 = Clorofila a los 90 DDS; CE90 = Conductancia estomática a los 90 DDS; AR2 = Altura a R2; AR7 = Altura a R7; APV = Altura a primera vaina; PxM = Plantas m⁻¹; VxM = Vainas m⁻¹; PLC = Plantas cosechadas; P100S = Peso de 100 semillas; REND = Rendimiento; S0 = Sin sequía; S1 = Con sequía; RxS = Reducción por sequía [(S0-S1)/S0]*100].

Estudios realizados por Makbul *et al.* (2011) determinaron que el contenido de clorofila y la conductancia estomática resultaron menores en soya estresada por sequía, en ésta última el decremento fue de 42 %. Songsri *et al.* (2013) confirmaron la reducción en la apertura y conductancia estomática debido a la sequía, sin embargo el estrés incrementó el uso eficiente del agua de los genotipos.

Por otro lado, Sloane *et al.* (1990) reportaron que la sequía redujo en más o menos la mitad el REND de la variedad de soya Forrest. Otros trabajos, tanto en invernadero como en campo, confirmaron que la sequía disminuye significativamente el REND de la soya, entre un 24 y 50 % (Frederick *et al.*, 2001; Sadeghipour y Abbasi, 2012).

Efectos genéricos de los genotipos intermedios sobre el rendimiento y otras características agronómicas

El mayor IDS lo alcanzaron H02-1656 y H98-1021 al sobresalir en seis de las siete características consideradas para el índice, el primero además alcanzó el REND más alto; otros genotipos que también resultaron superiores en REND fueron: H98-1240, Huasteca 400 y H06-0560 (Cuadro 4).

En este grupo el CVA mostró una correlación directa con CE90 ($r = 0.426$, $p < 0.05$), P100S ($r = 0.720$, $p < 0.0001$) y REND ($r = 0.659$, $p < 0.0001$), además se correlacionó negativamente con la APV ($r = -0.405$, $p < 0.01$). De acuerdo con estas correlaciones, las variaciones del agua influyeron en la CE90, en el P100S y en conjunto, en la acumulación del REND, lo cual es bastante congruente.

El REND estuvo asociado positivamente con CL90 ($r = 0.370$, $p = 0.05$), CE90 ($r = 0.585$, $p < 0.01$), VxM ($r = 0.604$, $p < 0.001$) y P100S ($r = 0.816$, $p < 0.0001$), y negativamente con APV ($r = -0.319$, $p < 0.05$) y PxM ($r = -0.365$, $p < 0.05$). Estas asociaciones indican que la acumulación del REND estuvo influenciada en forma progresiva por: APV, PxM, CL90, CE90, VxM y P100S, reflejando las características de más peso.

Otras variables que también se correlacionaron fueron: AR2 con AR7 ($r = 0.750$, $p < 0.0001$), AR7 con APV ($r = 0.313$, $p < 0.05$), PLC con AR2 ($r = 0.373$, $p < 0.05$) y con AR7 ($r = 0.374$, $p < 0.05$), CE90 con P100S ($r = 0.581$, $p < 0.01$), PxM con APV ($r = 0.618$, $p = 0.0001$) y con PLC ($r = 0.476$, $p < 0.01$) y VxM con AR2 ($r = 0.345$, $p < 0.05$).

Muñoz *et al.* (1983) encontraron que en potenciales hídricos altos, variedades sintéticas de maíz obtenidas usando el REND como criterio de selección, tuvieron tasas fotosintéticas y transpiratorias más elevadas que una sintética seleccionada bajo condiciones severas de sequía en invernadero (selección por marchitez permanente).

Cuadro 4. Efecto de los genotipos intermedios en el rendimiento de soya, en sus componentes y otras variables, e índices de selección.

Geno- tipo	CL90 (U. Spad)	CE90 (Mmol m ⁻² s ⁻¹)	AR2 (cm)	AR7 (cm)	APV (cm)	PxM (No.)	VxM (No.)	PLC (No.)	P100S (g)	REND (kg ha ⁻¹)	IDS
G12	30.7abc	410.4 a	27.7 b	33.9 ab	7.9 a	23.7ab	287.5a	176.0a	13.5a	1281.0a	6
G13	33.8ab	284.1 a	36.7 a	43.5 a	8.1 a	22.5b	386.5a	172.0a	11.4bcd	909.3b	4
G14	24.8abc	494.6 a	29.0 b	31.8 b	6.3 a	22.1b	335.3a	175.0a	11.6bcd	1057.3ab	3
G15	32.5abc	418.4 a	30.9 ab	35.7 ab	6.4 a	23.8ab	312.3a	174.7a	12.1abc	839.6b	6
G16	37.3 a	247.0 a	26.5 b	38.2 ab	6.9 a	22.2b	377.2a	174.2a	10.5cd	989.6ab	4
G17	31.0abc	190.6 a	25.4 b	31.2 b	7.6 a	27.5a	335.6a	167.2a	10.3d	911.3b	3
G18	25.4abc	264.9 a	24.7 b	27.4 b	6.1 a	19.6b	340.0a	133.0b	11.3bcd	886.8b	1
G19	28.6abc	326.6 a	25.3 b	31.3 b	6.8 a	22.8ab	344.7a	166.5a	12.7ab	1050.4ab	5
G20	19.6c	417.0 a	29.8 b	33.7 ab	7.4 a	23.3ab	344.2a	178.0a	10.6cd	926.6b	3
G21	20.4bc	339.0 a	25.6 b	29.8 b	6.1 a	21.3b	301.8a	172.0a	11.2bcd	936.6b	1

Medias con la misma letra entre genotipos no son diferentes.

G12 = H02-1656; G13 = Huasteca 200; G14 = H98-1240; G15 = H98-1021; G16 = Huasteca 400; G17 = H02-2224; G18 = H06-0589; G19 = H06-0560; G20 = H06-1192; G21 = H06-0698; CL90 = Clorofila a los 90 DDS; CE90 = Conductancia estomática a los 90 DDS; AR2 = Altura a R2; AR7 = Altura a R7; APV = Altura a primera vaina; PxM = Plantas m⁻¹; VxM = Vainas m⁻¹; PLC = Plantas cosechadas; P100S = Peso de 100 semillas; REND = Rendimiento; IDS = Índice de selección.

Efectos específicos a sequía en genotipos intermedios sobresalientes por efectos genéricos

De los tres genotipos con mayor REND en este grupo, H98-1240 fue el de mayor estabilidad al pasar de S0 a S1; H02-1656 presentó efectos específicos para condiciones favorables (Figura 2), es decir, para los ambientes en que la mayoría de los años son buenos en cuanto a lluvia.

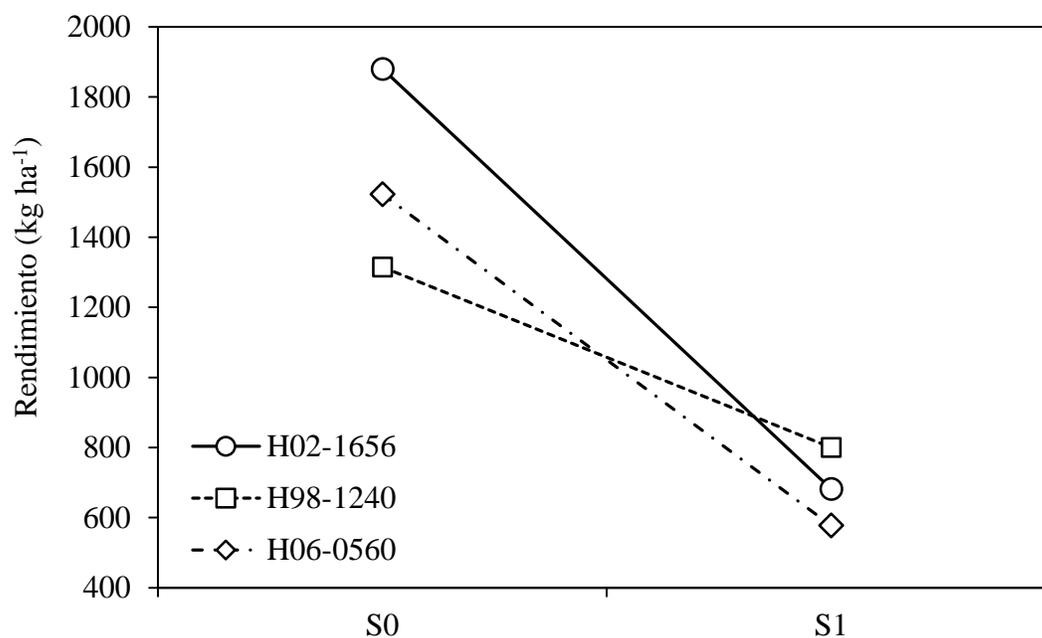


Figura 2. Efecto de la interacción niveles de sequía por genotipos sobre el rendimiento de los intermedios seleccionados con base en efectos genéricos.

S0 = Sin sequía; S1 = Con sequía.

Efectos genéricos de la sequía sobre el rendimiento y otras características agronómicas en los genotipos tardíos

Al igual que sucedió con los genotipos intermedios, el efecto de S1 redujo el nivel de la CL90 y la CE90, en este caso fue del 21.0 % y 51.1 % respectivamente; también afectó el P100S, disminución del 34.6 %, y en conjunto disminuyeron el REND en un 60.9 % (Cuadro 5).

Cuadro 5. Efecto de la sequía sobre el rendimiento y otras características agronómicas en genotipos de soya tardíos.

Nivel de sequía	CL90 (U. Spad)	CE90 (Mmol m ⁻² s ⁻¹)	AR2 (cm)	AR7 (cm)	APV (cm)	PLC (No.)	P100S (g)	REND (kg ha ⁻¹)
S0	40.9 a	613.2 a	32.9 a	43.3 a	6.7 a	172.1 a	12.4 a	1317.4 a
S1	32.3 b	299.6 b	34.0 a	42.2 a	7.7 a	175.3 a	8.1 b	513.8 b
RxS (%)	21.0	51.1	-3.3	2.5	-14.9	-1.8	34.6	60.9

Medias con la misma letra entre niveles de sequía no son diferentes.

CL90 = Clorofila a los 90 DDS; CE90 = Conductancia estomática a los 90 DDS; AR2 = Altura a R2; AR7 = Altura a R7; APV = Altura a primera vaina; PLC = Plantas cosechadas; P100S = Peso de 100 semillas; REND = Rendimiento; S0 = Sin sequía; S1 = Con sequía; RxS = Reducción por sequía [(S0-S1)/S0]*100].

Eck *et al.* (1987) estudiaron el efecto de la sequía en el cultivar Douglas, obteniendo una reducción en el REND de 45 % y 88 % cuando el estrés se aplicó en R5 y R7, respectivamente. De acuerdo con Ku *et al.*, (2013), las etapas más sensibles a la sequía en el ciclo de desarrollo de la soya, varían de acuerdo con los diferentes estudios realizados en diferentes latitudes y con diferentes cultivares.

Efectos genéricos de los genotipos tardíos sobre el rendimiento y otras características agronómicas

El mayor IDS lo consiguieron tres genotipos al sobresalir en todas las variables consideradas, estos fueron H02-1123, H10-0242 y H10-0556 (Cuadro 6). Masoumi *et al.* (2011) evaluaron cultivares de soya en tres niveles de sequía y encontraron diferencias en el contenido total de clorofila. Por otro lado, diferencias genotípicas para mantener los estomas abiertos a pesar del estrés por sequía, han sido reportadas ampliamente en soya (Vignes *et al.*, 1986).

Cuadro 6. Efectos genéricos de genotipos de soya tardíos sobre el rendimiento y otras características agronómicas e índice de selección.

Genotipo	CL90 (U. Spad)	CE90 (Mmol m ⁻² s ⁻¹)	AR2 (cm)	AR7 (cm)	APV (cm)	PLC (No.)	P100S (g)	REND (kg ha ⁻¹)	IDS
G22	35.8 a	452.3 ab	32.7 ab	37.2a	6.9 a	176.7 a	7.8 a	776.3a	2
G23	34.2 a	253.8 b	26.9 b	45.5a	6.3 a	174.3 a	7.4 a	659.8a	0
G24	39.2 a	567.5 a	35.0 ab	41.7a	8.0 a	175.7 a	11.3 a	794.7a	2
G25	35.5 a	462.3 ab	39.1 a	46.7a	7.8 a	168.7 a	13.2 a	1267.3a	2

Medias con la misma letra entre genotipos no son diferentes.

G22 = H02-1123; G23 = H06-1637; G24 = H10-0242; G25 = H10-0556; CL90 = Clorofila a los 90 DDS; CE90 = Conductancia estomática a los 90 DDS; AR2 = Altura a R2; AR7 = Altura a R7; APV = Altura a primera vaina; PLC = Plantas cosechadas; P100S = Peso de 100 semillas; REND = Rendimiento; IDS = Índice de selección.

Mientras que Chinchilla *et al.* (1990), concluyeron que variedades de soya dentro de cada hábito de crecimiento (determinadas, semideterminadas e indeterminadas), difirieron en la capacidad de mantener el REND final bajo condiciones de humedad limitada, pudiendo ser seleccionadas por su tolerancia a sequía. Sin embargo no se hizo la separación de efectos que propuso Muñoz (1997).

En este grupo hubo correlación del CVA con: CL90 ($r = 0.770$, $p < 0.01$), CE90 ($r = 0.699$, $p < 0.01$), P100S ($r = 0.528$, $p \leq 0.05$) y REND ($r = 0.812$, $p < 0.001$). En este caso el REND se correlacionó con: CL90 ($r = 0.758$, $p = 0.001$), CE90 ($r = 0.566$, $p < 0.05$) y P100S ($r = 0.736$, $p < 0.01$), de manera similar a como se observó en los grupos anteriores.

Se observaron asociaciones positivas de CE90 con CL90 ($r = 0.735$, $p < 0.01$), de P100S con CL90 ($r = 0.584$, $p < 0.05$) y con CE90 ($r = 0.524$, $p < 0.05$); y negativas de AR7 con PLC ($r = -0.612$, $p < 0.05$).

Efectos específicos a sequía en genotipos tardíos sobresalientes por efectos genéricos

La Figura 3 muestra los efectos específicos de los cuatro genotipos tardíos, ya que fueron pocos. No se presentaron efectos específicos lo cual puede apreciarse por el paralelismo de las rectas de H10-0556 con la de los genotipos restantes. Esto sugiere de acuerdo con Muñoz (1974), que este comportamiento es debido a la acción aditiva del efecto de S y del efecto de G y no por la acción multiplicativa de los dos factores. Por lo que en este caso, es mejor seleccionar por efectos genéricos.

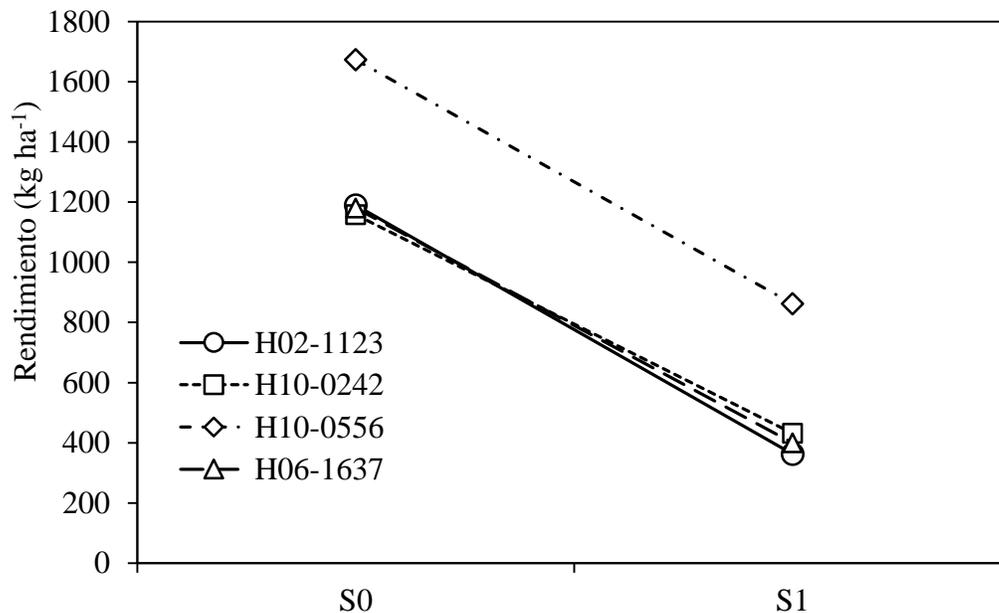


Figura 3. Efecto de la interacción niveles de sequía por genotipos sobre el rendimiento de los tardíos seleccionados con base en efectos genéricos.

S0 = Sin sequía; S1 = Con sequía.

Se observó que H10-0556 fue superior tanto en S0 como en S1, mientras que en los otros genotipos, H10-0242 disminuyó menos el REND de S0 a S1, debido a una mayor eficiencia de la CL90, la CE90 y el P100S (Cuadro 6).

Comparación del efecto de la sequía sobre los tres grupos de genotipos

Según el Cuadro 7, el P100S y el REND se redujeron más drásticamente en los tres grupos por efecto de S, observándose que el segundo disminuyó menos en los precoces y más en los tardíos, considerándose válida la aplicación del modelo 2 para la evaluación de resistencia a sequía propuesto por Muñoz (1997). La CL90 y la CE90 mostraron reducciones importantes en los intermedios y tardíos, indicando que son características muy sensibles a la sequía en la soya. La disminución en el P100S fue más o menos estable en los precoces, intermedios y tardíos, probablemente porque la densidad del grano dependió más bien del efecto de G y de S y no del ciclo fenológico de los genotipos.

Cuadro 7. Efecto de la sequía en porcentaje sobre cada una de las variables evaluadas en genotipos de soya precoces, intermedios y tardíos.

Grupo	CL90	CE90	AR2	AR7	APV	PxM	VxM	PLC	P100S	REND
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Precoces	-	-	-0.50	0.34	-1.81	0.88	14.2	3.6	33.5	41.5
Intermedios	11.9	53.2	0.35	-3.6	-17.1	-4.9	11.9	-1.5	30.6	48.7
Tardíos	21.0	51.1	-3.3	2.5	-14.9	-	-	-1.8	34.6	60.9

CL90 = Clorofila a los 90 DDS; CE90 = Conductancia estomática a los 90 DDS; AR2 = Altura a R2; AR7 = Altura a R7; APV = Altura a primera vaina; PxM = Plantas m⁻¹; VxM = Vainas m⁻¹; PLC = Plantas cosechadas; P100S = Peso de 100 semillas; REND = Rendimiento.

La CL90 disminuyó casi el doble en los genotipos tardíos que en los intermedios, mientras que la disminución en la CE90 fue parecida en los dos grupos, mostrando que el efecto en la transpiración no está determinado por las diferencias en el desarrollo fenológico. También se observó que las VxM se redujeron más en los precoces que en los intermedios. Cabe señalar que en algunas variables, S1 provocó un efecto positivo (valores negativos), pero el aumento es poco apreciable, a excepción de la APV, donde S1 la incrementa en los genotipos intermedios y tardíos (Cuadro 7).

CONCLUSIONES

Las características más sensibles a la sequía fueron: índice de clorofila, conductancia estomática, vainas m^{-1} , peso de 100 semillas y rendimiento. La sequía redujo en igual magnitud el peso de 100 semillas en los tres grupos de genotipos, sugiriendo que el efecto no está asociado con su ciclo fenológico; la disminución del rendimiento fue más intensa en los genotipos tardíos, atribuida a una reducción considerable de la clorofila, el peso de 100 semillas y la conductancia estomática en sequía. En los genotipos precoces, las variaciones del agua en el suelo influenciaron las vainas m^{-1} , el peso de 100 semillas y el rendimiento; en los intermedios influenciaron la conductancia estomática, el peso de 100 semillas, la altura a la primera vaina y el rendimiento; y en los tardíos influenciaron la clorofila, la conductancia estomática, el peso de 100 semillas y el rendimiento. El mayor índice de selección en los genotipos precoces lo consiguió H02-2224, H02-2091 y H02-2295; en los intermedios fue para H02-1656 y H98-1021; y en tardíos para H02-1123, H10-0242 y H10-0556. Los genotipos que obtuvieron mayor proporción de efectos específicos a sequía fueron: H02-2295 (precoz), H98-1240 (intermedio) y H10-0242 (tardío), considerándose como los más resistentes de acuerdo con el modelo utilizado y las condiciones particulares de del estudio.

LITERATURA CITADA

- Acosta D., E., J. Kohashi-Shibata y J. A. Acosta G. 1997. Rendimiento y sus componentes en frijol bajo condiciones de sequía. *Rev. Mex. Cienc. Agri.* 23: 139-150.
- Bowers G., R. 1995. An early soybean production system for drought avoidance. *J. Prod. Agric.* 8: 112-118.
- Brown E., A., Caviness C. E., and Brown D. A. 1985. Responses of selected soybean cultivars to soil moisture deficit. *Agron. J.* 77: 274-278.
- Castañón G., R. Cruz, Del Pino R. Panzo, E. Montiel M., y L. Filobello. 2000. Selección de líneas de maíz por resistencia a sequía. *Agron. Mesoam.* 11: 163-170.
- Chinchilla R., G. 1990. Tolerancia de la soya [*Glycine max* (L.) Merr] a la sequía. *Rev. ICA* 25: 283-292.
- Desclaux D., Huynh T. T., and P. Roumet. 2000. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. *Crop Sci.* 40: 716-722.
- Eck H., V., Mathers A. C., and Musick J. T. 1987. Plant water stress at various growth stages and growth and yield of soybeans. *Field Crop Res.* 17: 1-16.
- Ghassemi-Golezani K., and R. Lotfi. 2012. Response of soybean cultivars to water stress at reproductive stages. *Int. J. Pl. An. and Env. Sci.* 2: 198-202.

- Gill L., H. R., N. Maldonado M., V. Pecina Q. y N. Mayek P. 2008. Reacción de germoplasma mejorado de soya [*Glycine max* (L.) Merr.] a *Macrophomina phaseolina* (Tassi) goidanich y déficit hídrico. *Rev. Mex. Fitopatol.* 26: 105-113.
- Hernández S., J. H., y A. Muñoz, O. 1990. Selección de variedades de cacahuete e interacción con sequía en la Mixteca Baja. *In: Resúmenes del XIII Congreso Nacional de Fitogenética.* 3-7 de septiembre de 1990. Ciudad Juárez, Chihuahua, México. pp: 3-7.
- Kennedy A., R. 1995. The evidence for soybean products as cancer preventive agents. *The J. Nutr.* 125: 733-743.
- Ku, Y. S., Au-Yeung, W. K., Yung, Y. L., Li, M. W., Wen, C. Q., Liu, X., and Lam, H. M. 2013. Drought stress and tolerance in soybean. *In: Board J. E. (ed). A comprehensive survey of international soybean research - Genetics, physiology, agronomy and nitrogen relationships.* InTech, Croatia. pp. 209-237.
- Liu F., Andersen, M. N., and Jensen, C. R. 2003. Loss of pod set caused by drought stress is associated with water status and ABA content of reproductive structures in soybean. *Funct. Plant Biol.* 30: 271-280.
- Maldonado M., N., G. Ascencio L., G. Espinosa V., y M. de los A. Peña del R. 2013. Estrategias tecnológicas para contrarrestar la sequía en la producción de soya en el sur de Tamaulipas. INIFAP. México. 65 p.
- Makbul S., N. Saruhan Güler, N. Durmuş, and S. Güven. 2011. Changes in anatomical and physiological parameters of soybean under drought stress. *Turk. J. Bot.* 35: 369-377.

- Maleki A., Naderi, A., Naseri, R., Fathi, A., Bahamin, S., and Maleki, R. 2013. Physiological performance of soybean cultivars under drought stress. *Bull. Env. Pharmacol. Life Sci.* 2: 38-44.
- Muñoz O., A. 1974. Tamaño de la parcela, diseño y usos de los factoriales en la experimentación agrícola. Folleto Misceláneo No. 25. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, SAG. México. 38 p.
- Muñoz O., A. 1992. Modelo uno o de interacción genotipo por niveles de sequía y resistencia a factores adversos. *In: Memoria del Simposio Interacción Genotipo-Ambiente en Genotecnia Vegetal.* 22-27 de marzo. Sociedad Mexicana de Fitogenética, Guadalajara Jalisco, México. pp. 261-266.
- Muñoz, O., A. 1997. Model 2 to select for drought tolerance. *In: Edmeades, G. O, M. Bänzinger, H. R. Mickelson, and C. B. Peña V. (eds). Developing drought - and low N - tolerant maize. Proceedings of a symposium. CIMMYT. México, D. F. pp. 541-543.*
- Muñoz O., A., K. R. Stevenson, J. Ortíz C., G. W. Thurtell, y A. Carballo C. 1983. Transpiración, fotosíntesis, eficiencia en uso de agua y potencial hídrico en maíces resistentes a sequía y heladas. *Agrociencia* 51: 115-153.
- Oya T., Nepomuceno, A. L., Neumaier, N., Farias, J. R. B., Tobita, S., and Ito, O. 2004. Drought tolerance characteristics of brazilian soybean cultivars - Evaluation and characterization of drought tolerance of various brazilian soybean cultivars in the field. *Plant Prod. Sci.* 7: 129-134.

- Quispe S., M., A. Muñoz O., M. Velázquez J., y G. Martínez A. 1994. Selección de genotipos de arroz (*Oriza sativa* L.). *Agrociencia* 5: 79-90.
- Sadeghipour O., and Abbasi, S. 2012. Soybean response to drought and seed inoculation. *World Appl. Sci. J.* 17: 55-60.
- Sánchez D., S., A. Muñoz O., y V. A. González H. 2006. Evaluación de la resistencia a sequía de variedades de cacahuete (*Arachis hypogaea* L.) de hábito de crecimiento rastrero y erecto. *Rev. Chapingo Ser. Hort.* 12: 77-84.
- Sionit N., and Kramer, P. J. 1977. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. *Agron. J.* 69: 274-278.
- Sloane R. J., Patterson, R. P., and Carter, T. E. 1990. Field drought tolerance of a soybean plant introduction. *Crop Sci.* 30: 118-123.
- Sneller C. H., Dombek, D. 1997. Use of irrigation in selection for soybean yield potential under drought. *Crop Sci.* 37: 1141-1147.
- Songsri P., Jogloy, S., Junjittakarn, J., Kesmala, T., Vorasoot, N., Holbrook, C. C., and Patanothai, A. 2013. Association of stomatal conductance and root distribution with water use efficiency of peanut under different soil water regimes. *Aust. J. Crop Sci.* 7: 948-955.
- Vignes, D., Djekoun, A., and Planchon, C. 1986. Reponses de differents genotypes de soja au deficit hydrique. *Can. J. Plant Sci.* 66: 247-255.

CAPÍTULO III

RESISTENCIA A FACTORES ABIOTICOS EN SOYA: VARIACIÓN GENOTÍPICA E INTERACCIONES BAJO CONDICIONES DE EXCESO DE HUMEDAD DURANTE SU CRECIMIENTO

Julio César García Rodríguez, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2014

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue conocer la respuesta de la soya a dos condiciones de exceso de humedad en el suelo, considerando el genotipo, las fechas de muestreo y sus interacciones. La sobresaturación de humedad aumentó la altura de planta y redujo la temperatura del dosel. El menor grado de marchitez a los 75 días después de la siembra coincidió con altos niveles de clorofila y potencial hídrico, y temperatura del dosel más baja. Dos genotipos incrementaron la altura de planta en exceso de humedad, tres se mostraron insensibles al estrés. A los 100 días después de la siembra se registraron mayor altura de planta y potencial hídrico en la condición de estrés, sugiriendo recuperación del nivel de O₂ y del potencial de turgencia, que normalizaron los procesos metabólicos de las plantas, registrándose temperaturas foliares más bajas. Un grupo de genotipos casi no creció de los 45 a los 75 días después de la siembra, otros crecieron más del doble. A los 100 días después de la siembra, tres genotipos incrementaron la clorofila, el resto la disminuyó. Hubo genotipos que se marchitaron más de los 75 a los 100 días después de la siembra, otros mantuvieron su turgencia y otros la mejoraron. Se observó correlación negativa entre la altura de planta y el grado de marchitez a los 75 días después de la siembra. A los 100 días la clorofila también se correlacionó negativamente con el grado de marchitez. Los

procedimientos utilizados para las determinaciones morfológicas y fisiológicas, constituyen una forma confiable, sencilla y de bajo costo para estudiar el efecto de sobresaturación de humedad en el suelo en cada una de ellas, y en conjunto las diferentes respuestas de los genotipos al estrés en campo.

Palabras clave: *Glycine max* L. (Merr.), resistencia genética, anoxia, hipoxia, caracteres morfológicos y fisiológicos.

INTRODUCCIÓN

Aunque las principales áreas de producción de soya a nivel mundial se localizan en las regiones templadas, en las últimas décadas la expansión de este cultivo ha rebasado fronteras ecológicas y se ha logrado introducir en las zonas tropicales (Ascencio y Maldonado, 1998). El sur de Tamaulipas es la principal región productora de soya en México. Sin embargo, la mayoría de la superficie es de temporal (Ascencio *et al.*, 2013), por lo que uno de los principales problemas a los que se enfrenta el cultivo es la irregularidad de la precipitación durante su ciclo de producción, presentándose años con sequía y años con alta humedad por efecto de la ocurrencia de las lluvias en un periodo corto de tiempo.

Las fuertes lluvias o períodos prolongados con precipitación son causa de inundaciones y detrimento en la producción agrícola cuando este fenómeno se presenta, especialmente en terrenos con drenaje limitado y mantos freáticos poco profundos (Jitsuyama, 2013). Existen dos tipos de inundación: a) anegamiento, cuando sólo las raíces se encuentran cubiertas por el agua y b) sumersión completa, en el caso de que las plantas estén bajo el agua completamente (Van Toai *et al.*, 2001). El estrés por anegamiento es el más común y es el que menos daños causa, no obstante, en soya reduce el crecimiento y el rendimiento (Sallam y Scott, 1987), ya que la

fijación de N₂ es una de las características que más se ven limitadas cuando la soya está expuesta a este tipo de estrés (Sung, 1993).

Según Pezeshki (1994), la cantidad de O₂ en el suelo es aproximadamente del 20 %, similar a la cantidad que hay en la atmósfera. Cuando un suelo se inunda, el aire contenido en los poros es remplazado por agua restringiendo el flujo de O₂; éste es consumido rápidamente por la respiración de las raíces y por la actividad microbiana (Koppitz, 2004), causando hipoxia o anoxia, refiriéndose la primera a la disminución de O₂ por un drenaje pobre o anegamientos periódicos y la segunda a la ausencia completa de O₂.

Entre los síntomas que las plantas presentan por falta de O₂ se encuentran: clorosis, reducción en la tasa de crecimiento, rompimiento de las membranas celulares, interrupción del consumo de minerales, cierre estomático, marchitamiento, disminución de la respiración y fotosíntesis, alteración en la distribución de carbohidratos y potencialmente la muerte (Oosterhuis *et al.*, 1990; Pezeshki, 1994; VanToai *et al.*, 2003). Algunos cultivos reportados como susceptibles al estrés por inundación son: maíz (Yong-Zhong *et al.*, 2010), canola (Gutierrez *et al.*, 1996), frijol mungo (Sairam *et al.*, 2008), trigo (Zheng *et al.*, 2009), algodón (Milroy *et al.*, 2009), girasol (Grassini *et al.*, 2006) y garbanzo (Palta *et al.*, 2010). Algunas especies como el arroz, son capaces morfológicamente y/o fisiológicamente de adaptarse a altos contenidos de agua en el suelo (Riche, 2004).

La soya generalmente es considerada como susceptible a la inundación (Bacanamwo y Purcell, 1999), sin embargo, en comparación con otras leguminosas, existen evidencias de que posee habilidades para adaptarse a suelos inundados. Andreeva *et al.* (1987) reportaron que la soya es más tolerante a las inundaciones que el caupí. Boru *et al.* (2003) observaron

sobrevivencia y verdor de la hoja, en plantas cultivadas en N₂ (gas) con niveles de O₂ no detectable en periodos de 14 días, sugiriendo que la soya es más tolerante a altos niveles de agua y baja concentración de O₂ de lo que se pensaba.

El objetivo de este trabajo fue estudiar la respuesta de un grupo de genotipos de soya a condiciones de alta humedad en el suelo, a través de varias fechas de muestreo y sus interacciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

La precipitación total fue de 763.1 mm durante el ciclo de evaluación, que abarcó de agosto a diciembre de 2013. Los promedios de temperaturas máximas y mínimas fueron de 29.1 y 19.4 °C respectivamente. La Figura 1 muestra el comportamiento de las temperaturas y la precipitación a partir de octubre de 2012 y todo el 2013.

La siembra se realizó el 14 de agosto de 2013, aproximadamente un mes posterior a la fecha óptima de siembra en la región, que es del 15 de junio al 20 de julio, aunque Maldonado *et al.*, (2013) recomiendan la primera quincena de julio. Se utilizó un diseño factorial con arreglo de parcelas divididas con dos repeticiones, correspondiendo a las parcelas principales los niveles de exceso de humedad (A) y a las subparcelas los genotipos (G); las fechas de muestreo (FM) constituyeron el tercer factor de variación; a estos tratamientos se sumó el efecto de lluvia excesiva ocurrida en septiembre (Figura 1). Los niveles de A considerados fueron: suelo sin sobresaturación de humedad (A0) y suelo con sobresaturación de humedad debido a la aplicación de un riego más el exceso de lluvia ocurrida en septiembre (A1). El riego se aplicó dos meses posteriores a la siembra del experimento y fue por goteo.

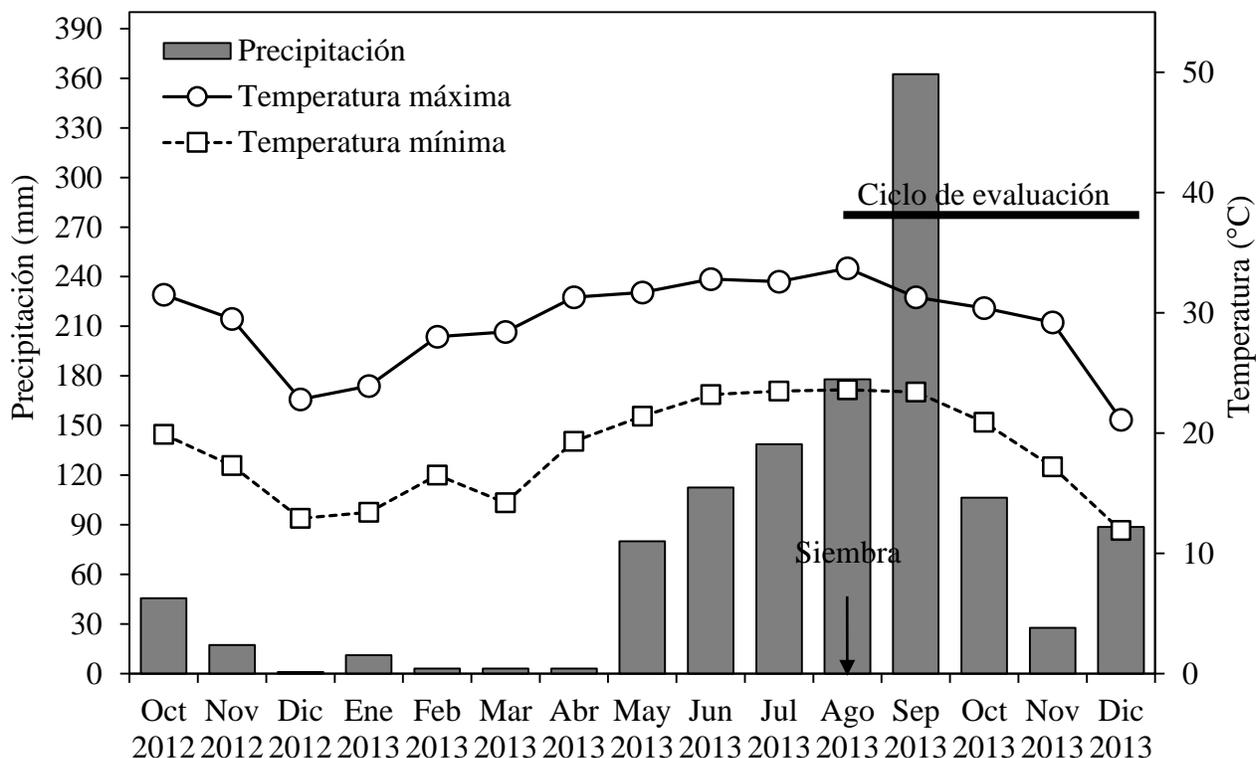


Figura 1. Temperaturas máximas, mínimas y precipitación pluvial mensual acumulada de octubre de 2012 a diciembre de 2013.

Los genotipos utilizados fueron cuatro variedades generadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) para el trópico húmedo de México: Tamesí, Huasteca 200, Huasteca 400 y Huasteca 300, y 21 líneas avanzadas del programa de mejoramiento genético de soya del mismo: H98-1052, H02-1656, H02-2309, H02-1337, H98-1325, H98-1240, H98-1021, H02-2248, H02-2091, H02-2331, H02-2295, H02-1991, H02-1123, H02-2224, H06-0589, H06-0560, H06-1192, H06-0698, H06-1637, H10-0242 y H10-0556.

La unidad experimental consistió de dos surcos de 5 m; la distancia entre surcos fue de 0.76 m y la parcela útil de 6.08 m² (dos surcos de 4 m). La densidad de población utilizada fue de 250,000 plantas ha⁻¹.

Se midió: altura de planta (AP), temperatura del dosel (TD), clorofila (CL), y potencial hídrico (PHI) a los 45, 75 y 100 días después de la siembra (DDS) (FM45, FM75 y FM100 respectivamente). El grado de marchitez (GM) se calificó a los FM75 y FM100. Para AP se consideraron cinco plantas al azar. El PHI se midió en tres hojas intermedias mediante el uso de una bomba de presión hidráulica, diseñada por el Dr. Juan Velázquez Mendoza del Colegio de Postgraduados. El GM se calificó visualmente observado el aspecto de toda la unidad experimental, en una escala de 1 a 5, donde 1 corresponde a nulo marchitamiento y 5 a marchitamiento avanzado. Además se tomaron los días a R2 (floración completa) y a R8 (maduración completa) de cada genotipo.

Se efectuaron análisis de varianza mediante el programa estadístico SAS 9.0. Se recurrió a la prueba de Tukey para la comparación de medias. Se determinó un índice de selección (IDS), de acuerdo con el procedimiento propuesto por Quispe *et al.* (1994), explicado en el capítulo II. Las interacciones significativas se graficaron. En el caso de A*G para AP, se calculó las diferencias A0-A1 para cada genotipo y se asignaron al eje de las Y, graficándose contra los genotipos asignados al eje de las X. Para conocer el grado de asociación entre variables y entre éstas y los días a R2, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 1 presenta el análisis de variación, el cual muestra efecto de los niveles de A en la AP y TD; de G en la AP, TD, CL y GM; mientras que las FM influyeron en todas las variables. Las interacciones significativas correspondieron a A*G sobre AP, A*FM sobre AP, TD, y PHI; mientras que G*FM influyó en AP, TD, CL y GM.

Cuadro 1. Análisis de variación en características morfológicas y fisiológicas de 25 genotipos de soya evaluados bajo dos condiciones de exceso de humedad.

Factores	GL	AP	TD	CL	PHI	GM
A	1	497.1**	15.5**	17.4 ns	0.00005 ns	0.12 ns
G	24	172.1**	4.7**	131.5**	0.01 ns	3.7**
FM	2	2361.8**	1089.9**	5338.6**	1.2**	66.1**
A*G	24	15.5**	0.9 ns	16.9 ns	0.006 ns	0.2 ns
A*FM	24	25.7*	12.9**	18.8 ns	0.05*	0.6 ns
G*FM	48	44.9**	3.4**	136.4**	0.007 ns	2.3**
A*G*FM	48	3.9 ns	0.8 ns	16.2 ns	0.005 ns	0.1 ns
CV		7.1	4.3	9.9	21.0	25.5

*, ** Significancia al 0.05 y 0.01 % respectivamente; ns = No significativo; CV = Coeficiente de variación; GL = Grados de libertad; AP = Altura de planta; TD = Temperatura del dosel; CL = Clorofila; PHI = Potencial hídrico; GM = Grado de marchitez.

Efecto de los niveles de exceso de humedad sobre la altura de planta y temperatura del dosel

La Figura 2 muestra que la AP fue mayor en A1, en contraste la TD se elevó en A0. Lo anterior sugiere que el suelo con sobresaturación de humedad generó un efecto positivo en la AP y que el aumento en la TD puede atribuirse a una menor transpiración o intercambio gaseoso que redundó en la reducción del crecimiento y desarrollo del follaje en A0.

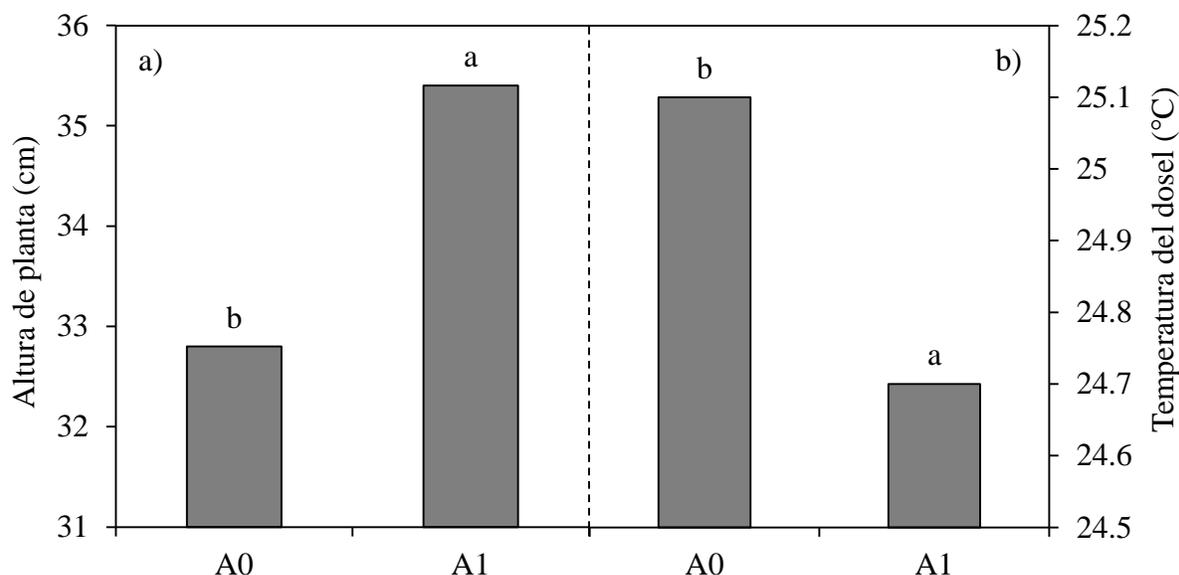


Figura 2. Efecto del exceso de humedad sobre la altura de planta (a) y temperatura del dosel (b) ignorando los genotipos y las fechas de muestreo.

Medias con la misma letra entre niveles de exceso de humedad no son diferentes.

A0 = Sin sobresaturación de humedad; A1 = Con sobresaturación de humedad.

Por el contrario, Sallam y Scott (1987) reportaron que inundaciones prolongadas durante el inicio de la etapa vegetativa redujeron el crecimiento de la raíz y el tallo de la soya; Henshaw *et al.*, (2007) mencionaron que plantas inundadas exhibieron menor peso seco del tallo y hojas, mientras que en algodón, Reicosky *et al.* (1985) descubrieron que a los ocho días de inundación (más del 60% de las raíces inundadas) la temperatura del follaje fue de 4 a 6 °C superior en comparación con plantas no inundadas.

En este caso, el exceso de humedad se acumuló durante septiembre (Figura 1), cuando las plantas estaban en fase vegetativa, donde los efectos de la inundación son menos severos (Oosterhuis *et al.*, 1990). En octubre la humedad disminuyó y la aplicación del riego en A1, en fase reproductiva del cultivo, generó ganancias en la AP y la disminución en la TD.

Variación genotípica sobre la altura de planta, temperatura del dosel, clorofila, marchitez y potencial hídrico

El genotipo que más creció fue H10-0556 mostrando superioridad sobre el resto; la AP menor fue para H06-0589, aunque compartió el efecto con otros cuatro genotipos (Figura 3). Las AP registradas fueron bajas considerando que Ascencio y Maldonado (1998) mencionaron que la AP óptima para la cosecha en el sur de Tamaulipas es de 70 cm. Lo cual pudiera explicarse por la sensibilidad de los genotipos al exceso de humedad en el suelo durante el ciclo de evaluación y al fotoperiodo que se acortó por el retraso en la fecha de siembra, además de que el promedio de la AP se redujo por efecto de las FM.

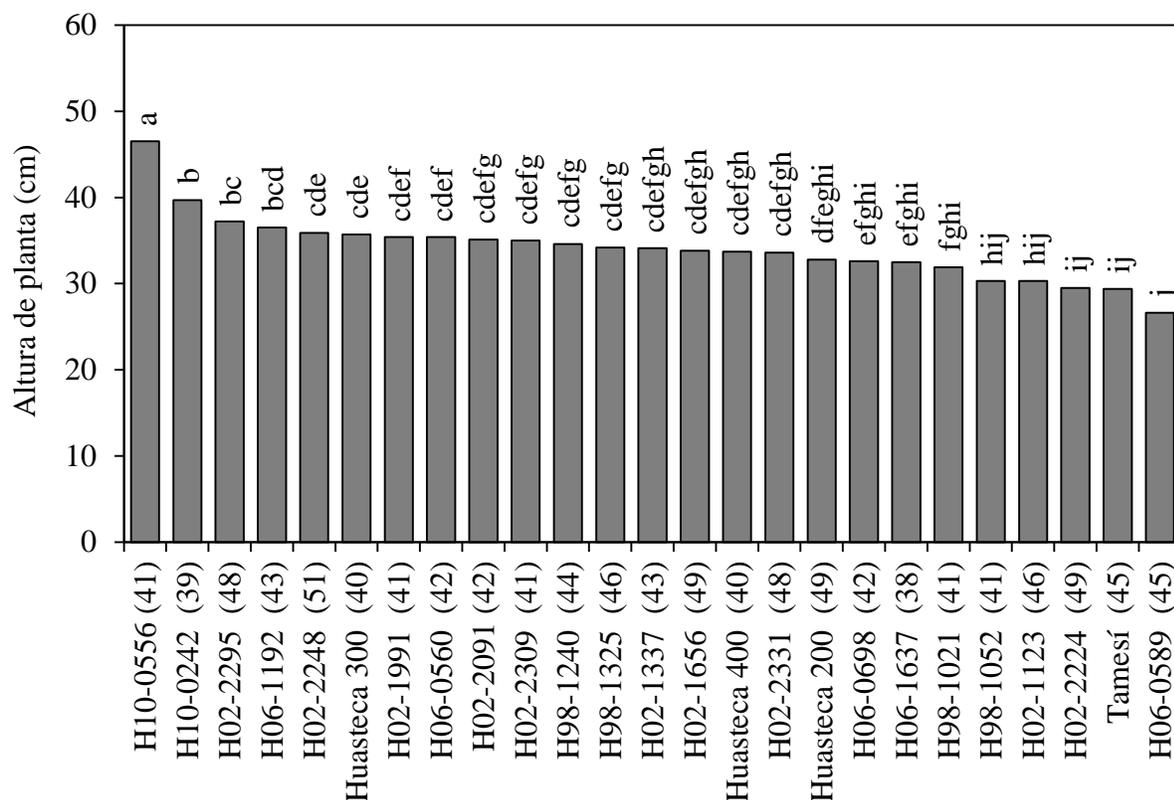


Figura 3. Variación genotípica sobre la altura de planta ignorando los niveles de exceso de humedad y las fechas de muestreo.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo
Medias con la misma letra entre genotipos no son diferentes.

Los autores antes mencionados también determinaron que el límite de siembra para las variedades UFV-1 y Santa Rosa es alrededor del 15 de julio, ya que después de esa fecha los días a R2 son menores a 45 y la AP a R8 es poco probable que supere los 65 cm.

La AP no estuvo correlacionada con la precocidad de los genotipos, a diferencia de Ascencio y Maldonado (1998) que encontraron correlaciones positivas de 0.720 entre los días a R2 y la AP cuando ensayaron cuatro variedades de soya en el sur de Tamaulipas durante el ciclo primavera-verano. En Cuba, Fundora *et al.*, (2003) reportaron AP entre 26.01 y 44.05 cm para genotipos precoces de soya y de 28.1 a 70.2 para genotipos intermedios y tardíos.

En TD, 21 genotipos registraron los valores más bajos, destacando del grupo H10-0556 y H02-1991 como los más frescos (Figura 4), hubo una diferencia de 2.6 °C entre los valores extremos.

Según Feng *et al.* (2009), la reducción de la temperatura del follaje es bastante útil como indicador de rendimiento y tolerancia a estreses abióticos; se ha reportado en el caso de trigo que genotipos con baja TD tienen aspectos fisiológicos y metabólicos superiores que genotipos con alta TD. Algunos trabajos han mostrado una relación directa entre el rendimiento y TD más frescas en esta especie (Fischer *et al.* 1998; Balota *et al.*, 2007).

El coeficiente de correlación no resultó significativo entre los días a R2 y la TD, tampoco entre la TD y la AP, aunque coincidió que el genotipo más alto también fue el que registró el valor de TD menor según las Figuras 3 y 4.

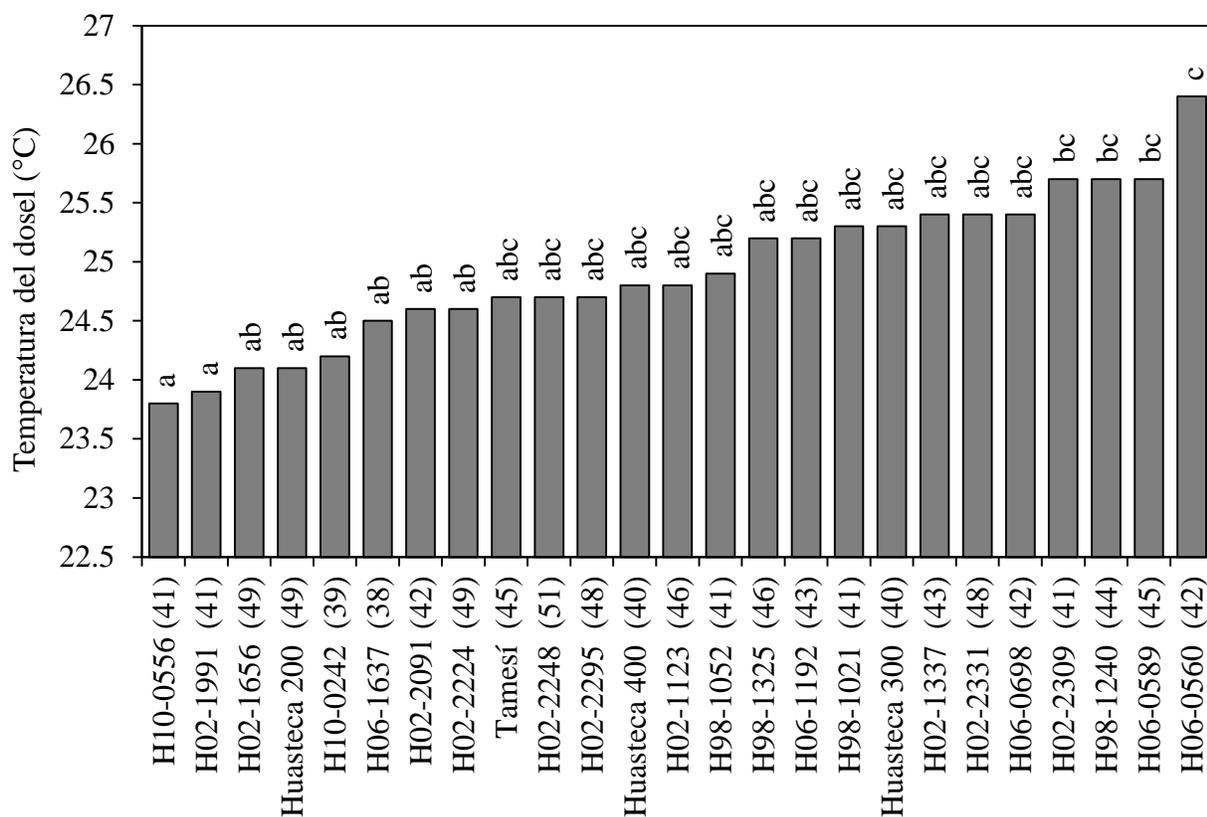


Figura 4. Variación genotípica sobre la temperatura del dosel ignorando los niveles de exceso de humedad y fechas de muestreo.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

Medias con la misma letra entre genotipos no son diferentes.

Con respecto al índice de CL, sobresalieron un grupo de 15 genotipos destacando Huasteca 200 por alcanzar el valor más alto y por registrar el más bajo, aunque compartió el efecto con otros cuatro genotipos (Figura 5). Coincidió que H06-0560 también registró el valor mayor de TD (Figura 4).

Ma *et al.*, (1995) concluyeron que las mediciones de CL con el SPAD-502 se correlacionaron positivamente con las tasas de fotosíntesis en genotipos de soya. En condiciones de inundación, la soya presenta una disminución drástica en la fotosíntesis neta, ésta se redujo en 33 y 32 % durante las etapas V4 y R2 respectivamente en el cultivar Essex, después de 48 h de inundación,

mientras que en Forrest, las reducciones fueron del 16 y 22 % en las mismas condiciones (Oosterhuis *et al.*, 1990).

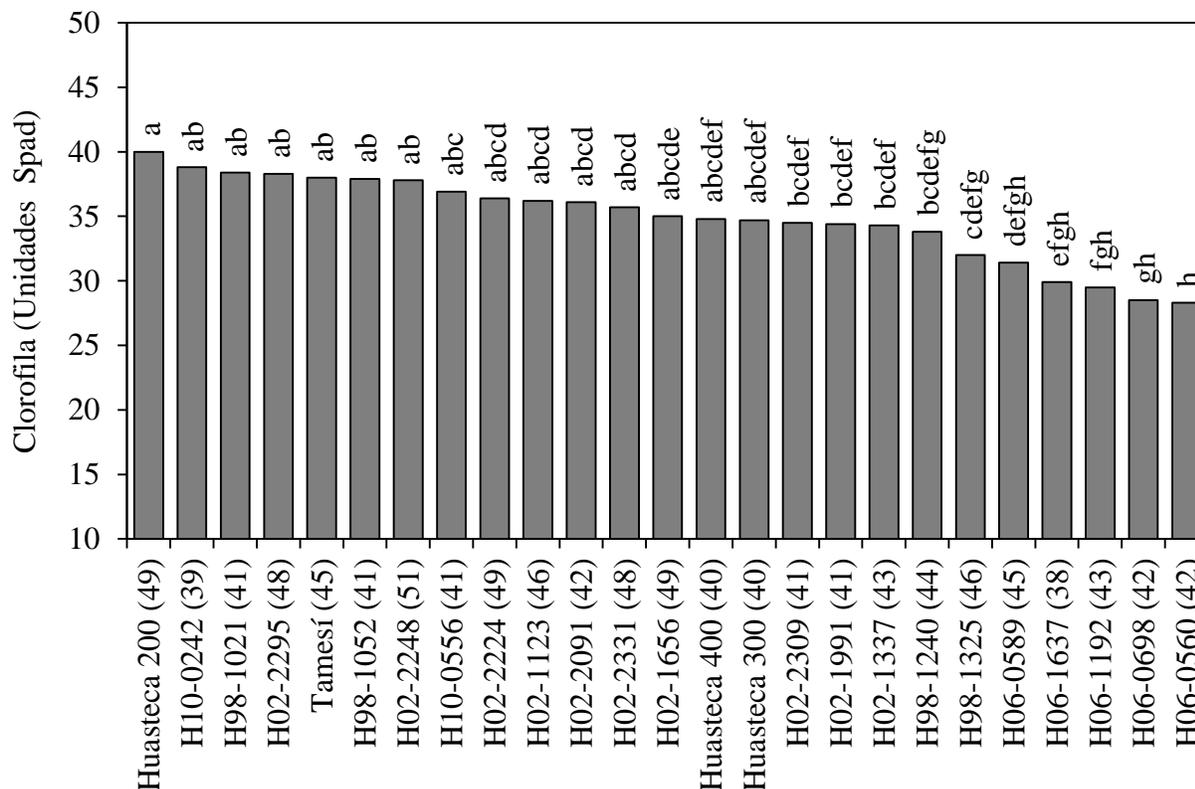


Figura 5. Variación genotípica sobre el nivel de clorofila ignorando los niveles de exceso de humedad y las fechas de muestreo.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

Medias con la misma letra entre genotipos no son diferentes.

La correlación del índice de CL con los días a R2 no resultó significativa, por lo que dicha característica no estuvo vinculada con el ciclo fenológico de los genotipos. Tampoco se correlacionó con la AP, pero sí con la TD, aunque en forma negativa ($r = -0.540$, $p \leq 0.01$), indicando que la CL se acumuló en los genotipos con TD más baja.

Para el GM, las diferencias entre genotipos mostraron que un grupo de diez se marchitaron menos, H10-0242 presentó el menor GM dentro del grupo; 13 genotipos se marchitaron más (Figura 6). King *et al.* (2009) señalaron que más de un mecanismo puede ser el responsable del

marchitamiento, ya que genotipos de mayor y menor GM respondieron de manera similar al espacio entre surcos, al contenido volumétrico de agua en el suelo y al déficit hídrico en invernadero.

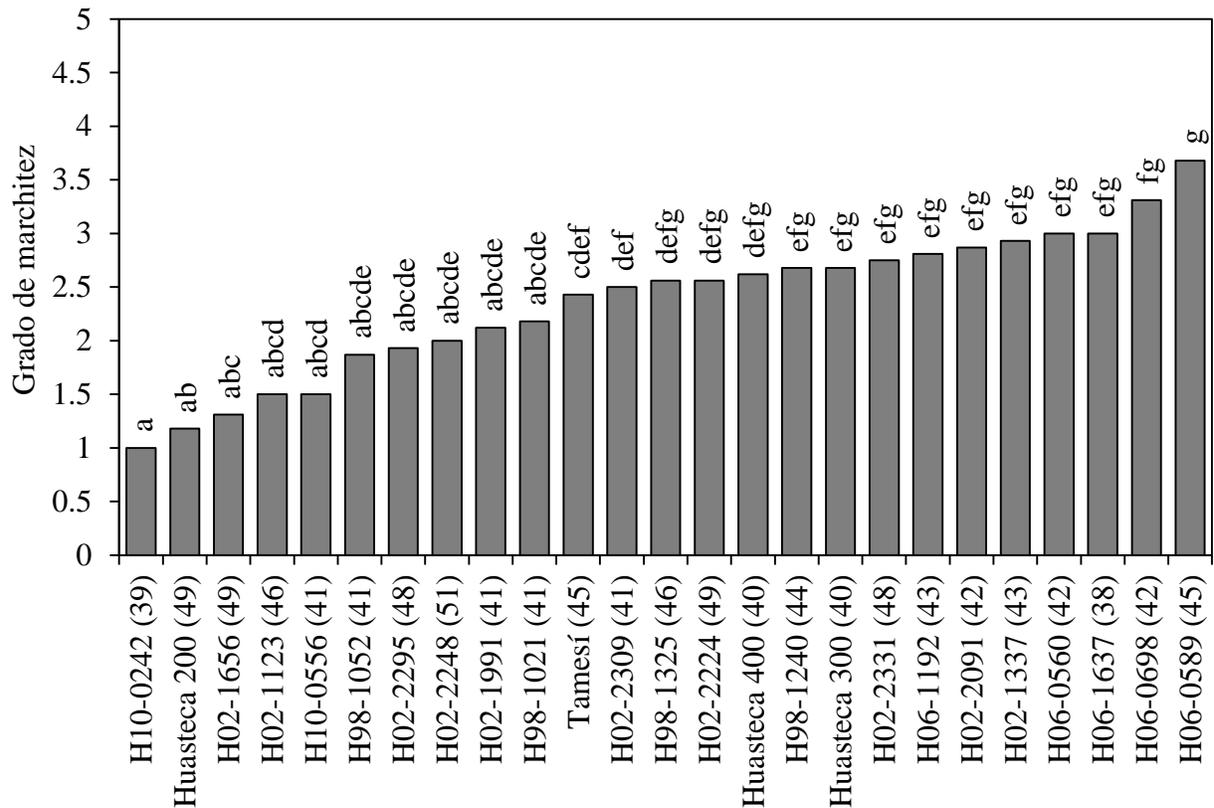


Figura 6. Variación genotípica sobre el grado de marchitez ignorando los niveles de exceso de humedad y las fechas de muestreo.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

Medias con la misma letra entre genotipos no son diferentes.

En este experimento las características que contribuyeron al GM fueron la TD y el nivel de CL, ya que se observó una asociación directa con la primera ($r = 0.688$, $p \leq 0.001$) e inversa con la segunda ($r = -0.721$, $p \leq 0.0001$), lo cual indica que los genotipos con mayor TD y con menor nivel de CL se marchitaron en mayor grado. Los días a R2 de los genotipos y el GM no estuvieron correlacionados. Cabe señalar que aunque todos los genotipos tuvieron el mismo comportamiento con respecto al PHI, el intervalo registrado osciló entre -0.44 y -0.55 Mpa, éste

se correlacionó negativamente con el GM ($r = -0.516$, $p \leq 0.01$), es decir, que a mayor GM menor PHI. Con las otras variables no se registró correlación, incluyendo los días a R2.

Índice de selección

H10-0556 sobresalió en todas las variables consideradas para el IDS que fue de 4, un grupo de seis genotipos obtuvo un IDS de 3, el grupo más numeroso alcanzó un IDS de 2, cinco genotipos registraron un IDS de 1 y cuatro genotipos no sobresalieron en ninguna de las características (Cuadro 2). Se observó que las variables que más contribuyeron al IDS fueron la TD y la CL.

Cuadro 2. Índice de selección en 25 genotipos de soya evaluados ignorando los niveles de exceso de humedad y las fechas de muestreo.

Variable	Genotipos																									
	H02-2309	H98-1240	H06-0589	H06-0560	H98-1325	H06-1192	H06-0698	H06-1637	H02-1991	H02-1337	Tamesí	H98-1021	Huasteca 400	H02-2248	H02-2091	H02-2331	H02-2224	Huasteca 300	H02-2295	H02-1123	H98-1052	H02-1656	Huasteca 200	H10-0242	H10-0556	
AP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
TD	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
GM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
IDS	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	

AP = Altura de planta, TD = Temperatura del dosel, CL = Clorofila, GM = Grado de marchitez, PHI = Potencial hídrico, IDS = Índice de selección.

Efecto de las fechas de muestreo sobre la altura de planta, temperatura del dosel, clorofila, marchitez y potencial hídrico

La AP aumentó de los FM45 a los FM100, el mayor incremento se efectuó entre los FM45 y los FM75 (Figura 7).

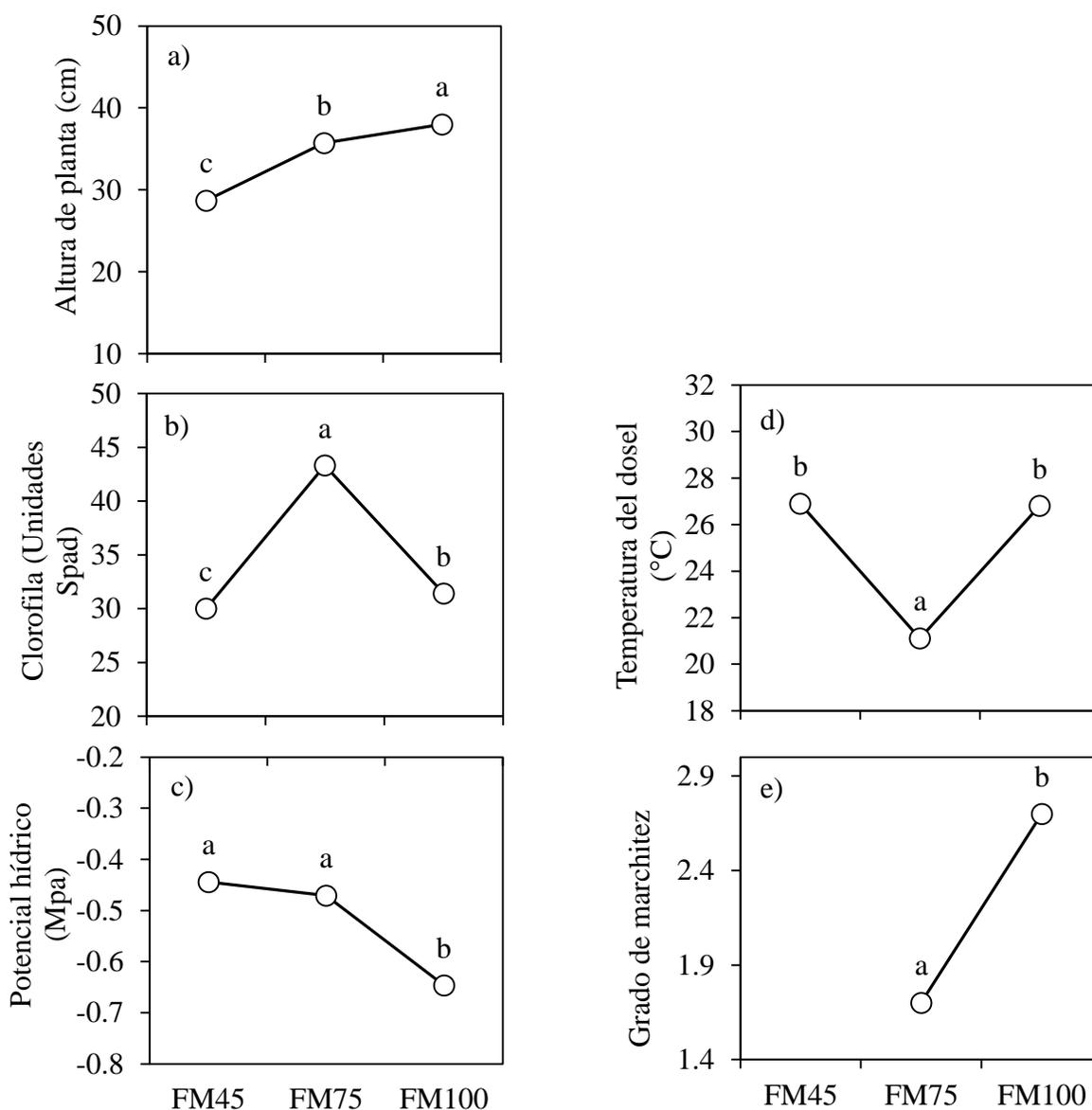


Figura 7. Efecto de las fechas de muestreo sobre: a) altura de planta, b) clorofila, c) potencial hídrico, d) temperatura del dosel y e) grado de marchitez, ignorando los niveles de exceso de humedad y los genotipos.

Medias con la misma letra entre fechas de muestreo no son diferentes.

FM45 = 45 días después de la siembra (dds); FM75 = 75 dds; FM100 = 100 dds.

Con respecto a las otras variables, a los FM75 se tuvieron los valores superiores, a excepción del PHI que fue superior también a los FM45. El menor GM en esta fecha coincidió con altos niveles de CL y PHI, y TD más baja (Figura 7), por efecto de un riego aplicado en A1 después de un periodo considerable sin lluvia.

La elevada precipitación durante la etapa vegetativa contribuyó a que en FM45 la TD fuera mayor por reducción de la expansión foliar, debido a un menor nivel de CL por baja actividad fotosintética. El PHI se mantuvo entre las dos primeras FM, mediciones realizadas después de los dos periodos de mayor humedad respectivamente, concordando con lo reportado por Oosterhuis *et al.* (1990), ya que encontraron poca afectación en el PHI por efecto del exceso de humedad. A los FM100, los genotipos entraron en etapa de senescencia y ya no hubo precipitaciones considerables sobre el experimento, entonces la TD se incrementó, la CL y el PHI se redujeron y por ende, el GM aumentó.

Interacción de niveles de exceso de humedad por genotipos sobre la altura de planta

La mayoría de los genotipos incrementaron su AP por efecto de A1 (valores negativos); H10-1123 y H98-1021 la redujeron (valores positivos), mostrando su susceptibilidad en esta característica a los niveles de sobresaturación de humedad evaluados; y H10-0556, H06-0589 y H10-0242 se mostraron insensibles a las diferencias en el contenido de agua en el suelo (Figura 8).

Al respecto, VanToai *et al.* (2010) también encontraron que de 21 genotipos de soya evaluados bajo condiciones de inundación, dos mostraron mayor AP en estrés, en comparación con el resto de genotipos que disminuyeron la AP por efecto del anegamiento.

El coeficiente de correlación indicó que las diferencias A0-A1 sobre la AP, no dependieron de los días a R2 de los genotipos.

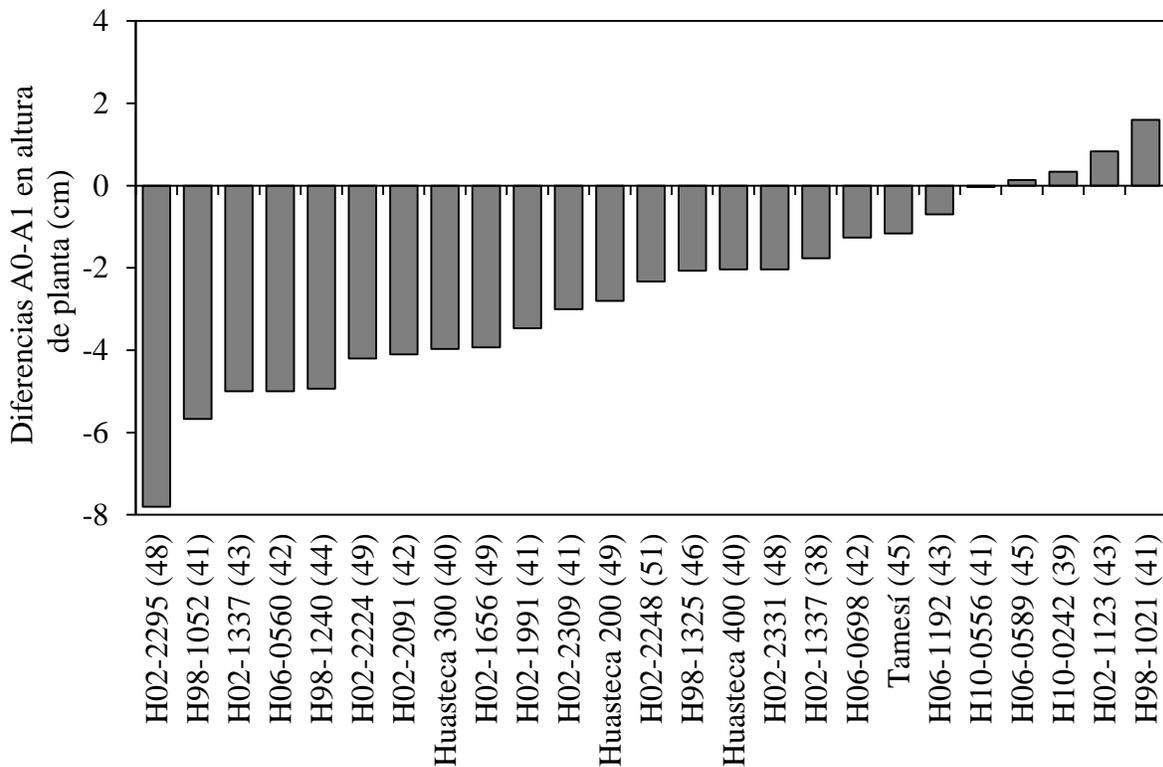


Figura 8. Diferencias (A0-A1) en la altura de planta de 25 genotipos de soya evaluados ignorando las fechas de muestreo.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

Interacción niveles de exceso de humedad por fechas de muestreo sobre altura de planta, temperatura del dosel y potencial hídrico

Se observó un comportamiento casi paralelo de los niveles de A en la AP a través de las FM, la AP fue mayor en A1 que en A0 (Figura 9); las diferencias fueron menores a los FM45, sugiriendo que la precipitación ocurrida en septiembre se acumuló más en A1 por efecto de la pendiente del suelo, contribuyendo a una mayor AP; las diferencias se incrementaron a los FM75, por el riego aplicado en A1 después de un periodo sin lluvia, y se mantuvieron hasta los FM100.

La sobresaturación de humedad redujo la TD a los FM45, de manera similar ocurrió a los FM100, influyendo en la AP; mientras que el PHI fue menor a los FM45 en sobresaturación y se incrementó al bajar la humedad a los FM100 (Figura 9).

Se pudo observar que a los FM100, A1 registró mayor AP y el PHI también fue más alto, sugiriendo que fue recuperándose el nivel de O₂ en el suelo y al mismo tiempo se elevó el potencial de turgencia. Al restaurarse el PHI se normalizaron todos los procesos metabólicos de las plantas, registrándose TD más bajas.

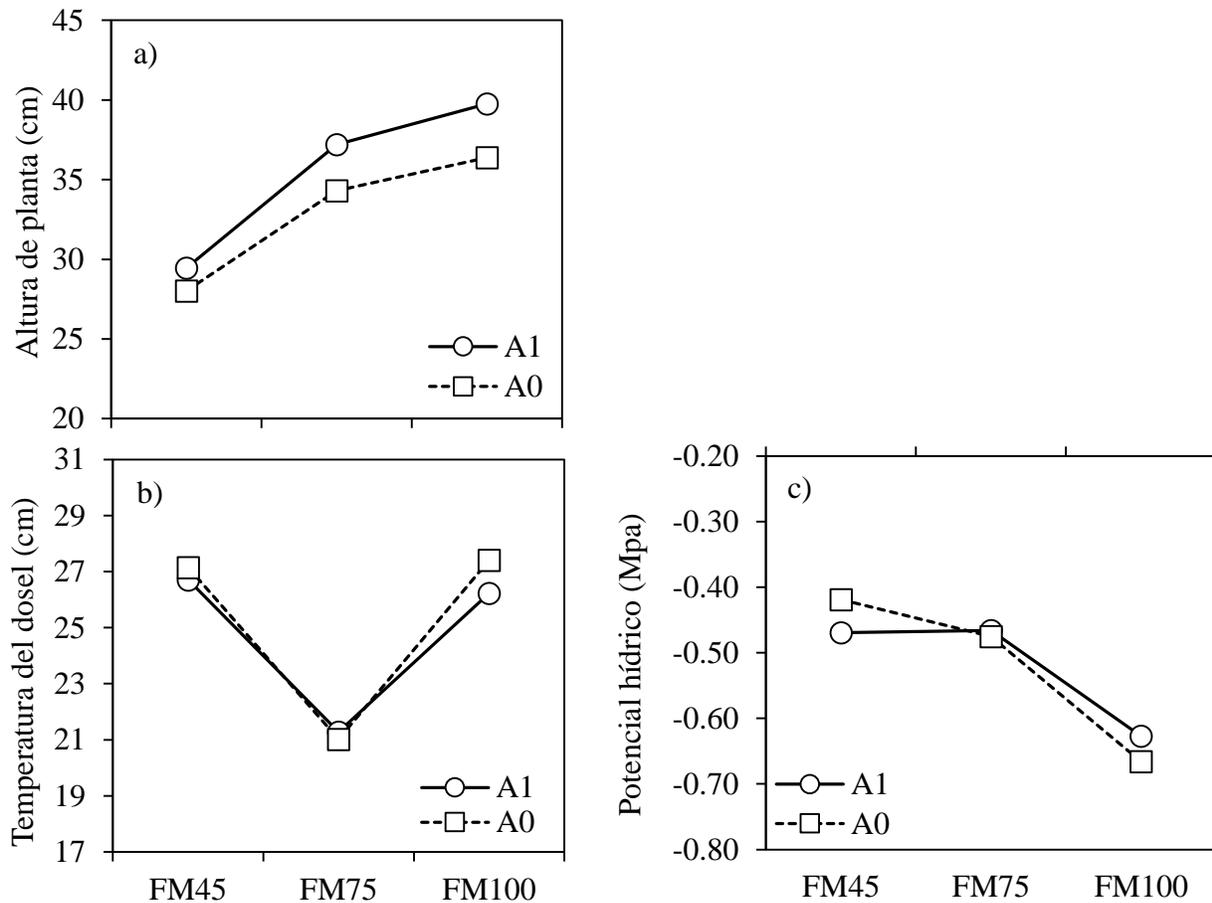


Figura 9. Interacción niveles de exceso de humedad por fechas de muestreo sobre: a) la altura de planta, b) temperatura del dosel y c) potencial hídrico, ignorando los genotipos. FM45 = 45 días después de la siembra (dds); FM75 = 75 dds; FM100 = 100 dds.

Interacción fechas de muestreo por genotipos sobre altura de planta, temperatura del dosel, clorofila y marchitez

El crecimiento más fuerte se dio entre los FM45 y los FM75, entre los FM75 y los FM100 las diferencias son leves pero de tendencia notablemente paralela (Figura 10).

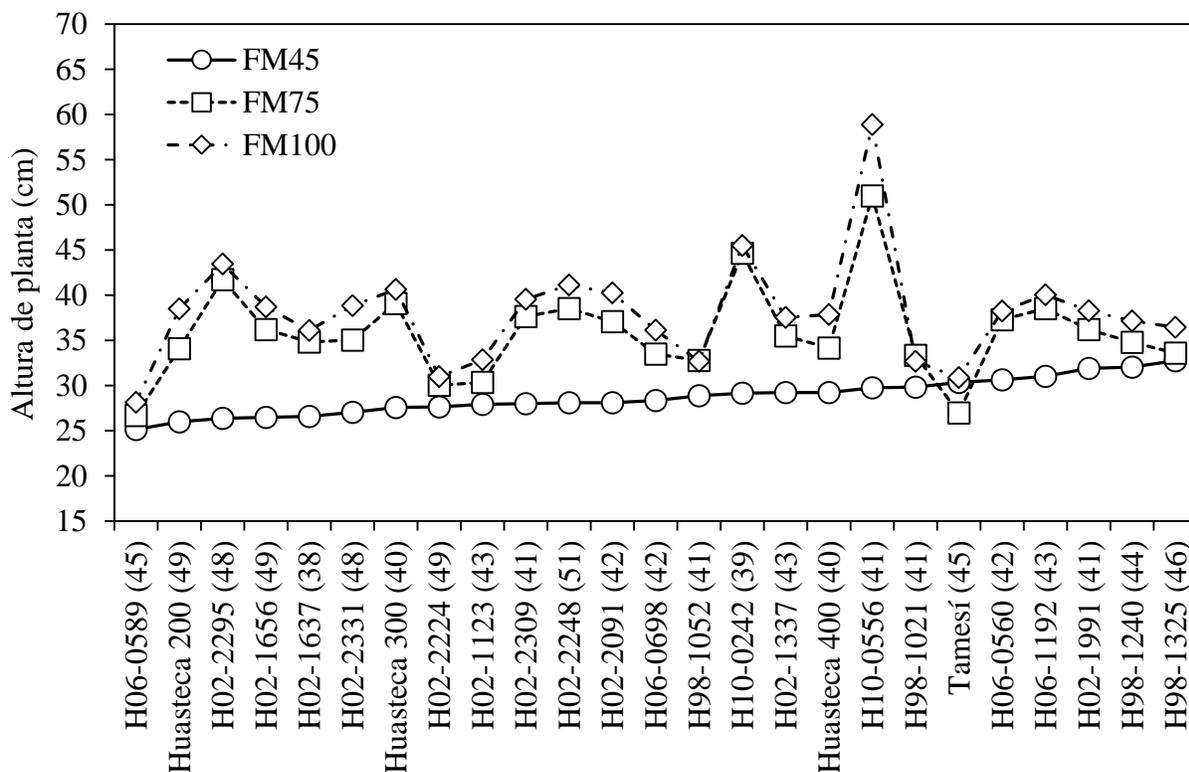


Figura 10. Interacción fechas de muestreo por genotipos sobre la altura de planta ignorando los niveles de exceso de humedad.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

FM45 = 45 días después de la siembra (dds); FM75 = 75 dds; FM100 = 100 dds.

El incremento en la mayoría de los genotipos fue mayor de FM45 a FM75; destacó H10-0556 como el que más creció tanto de FM45 a FM75 como de FM75 a FM100 (Figura 10), evidenciando mayor respuesta en la AP en esta etapa, lo cual indicó que la recuperación después de la sobresaturación fue bastante variada.

En CL la respuesta entre los FM45 y FM75 fue bastante regular si se compara con la AP y de los FM75 a los FM100 decayó en la mayoría de los genotipos, posiblemente como efecto de la senescencia, dado que los picos más bajos son de genotipos precoces (Figura 11).

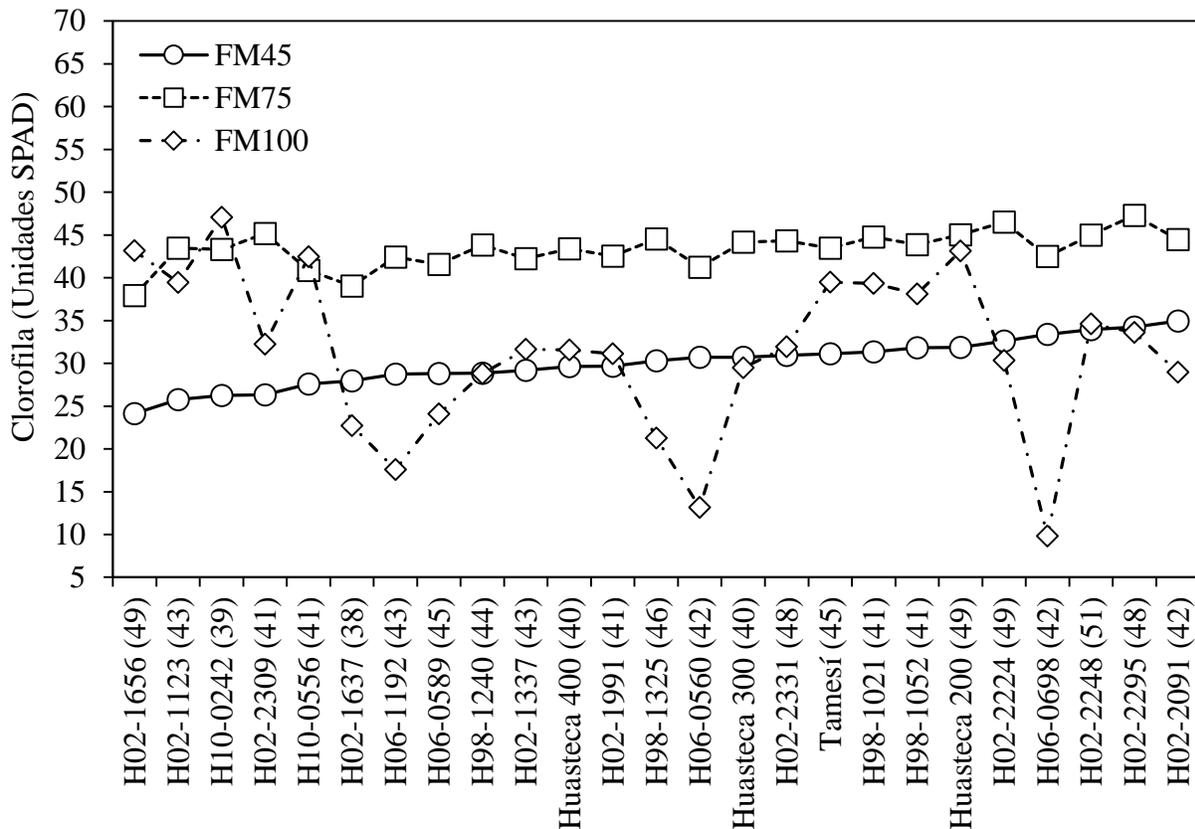


Figura 11. Interacción fechas de muestreo por genotipos sobre la clorofila ignorando los niveles de exceso de humedad.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

FM45 = 45 días después de la siembra (dds); FM75 = 75 dds; FM100 = 100 dds.

El GM también fue altamente variable entre FM, ya que la interacción mostró que hubo genotipos que se marchitaron más de FM75 a FM100, mientras que otros no se marchitaron o incluso, mostraron una mejor apariencia en la última FM (Figura 12).

Entre los primeros hubo coincidencia con los que redujeron su nivel de CL de FM75 a FM100, mientras que el grupo de los segundos contempló a los que mantuvieron o incrementaron la CL de FM75 a FM100, además de Huasteca 200 y Tamesí.

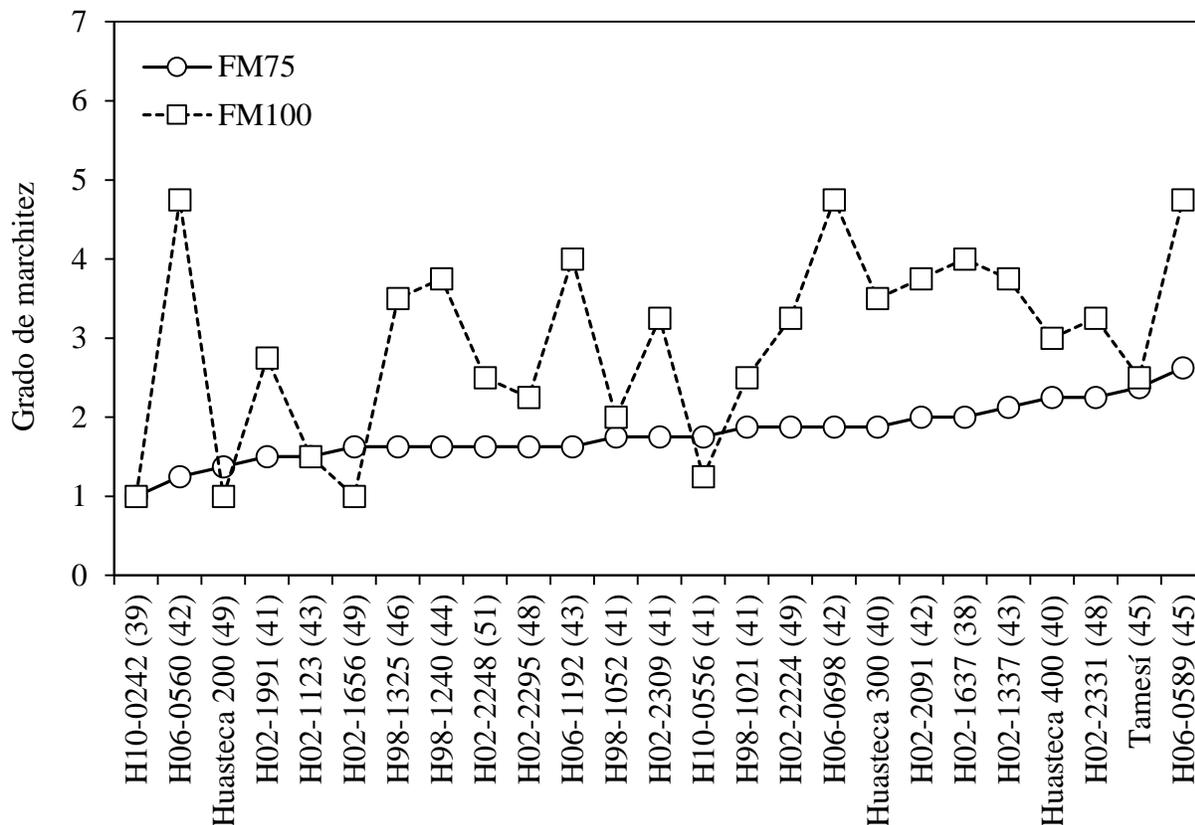


Figura 12. Interacción fechas de muestreo por genotipos sobre el grado de marchitez ignorando los niveles de exceso de humedad.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

FM75 = 75 días después de la siembra; FM100 = 100 dds.

Se presentaron correlaciones significativas de AP a los FM75 con el GM a los FM75 ($r = -0.549$, $p \leq 0.01$) y de GM a los FM100 con CL a los FM100 ($r = -0.909$, $p \leq 0.0001$). Es decir, que a los FM75 los genotipos más altos estaban menos marchitos y que a los FM100 los genotipos con mayor CL presentaron menor GM. Ninguna variable se asoció con los días a R2.

CONCLUSIONES

La sobresaturación de humedad aumentó la altura de planta y redujo la temperatura del dosel. H10-0556 fue el genotipo con mayor proporción de efectos genéricos. La disminución de clorofila se asoció con alta temperatura del dosel; el grado de marchitez se incrementó en función

de: mayor temperatura del dosel, menor clorofila y menor potencial hídrico. El menor grado de marchitez a los 75 días después de la siembra coincidió con altos niveles de clorofila y potencial hídrico, y temperatura del dosel más baja, por efecto de un riego aplicado en sobresaturación después de un periodo sin lluvia. Dos genotipos incrementaron la altura de planta en exceso de humedad, tres se mostraron insensibles al estrés. A los 100 días después de la siembra se registraron mayor altura de planta y potencial hídrico en la condición de estrés, sugiriendo una recuperación del nivel de O_2 en el suelo y un incremento en el potencial de turgencia; al restaurarse el potencial hídrico se normalizaron los procesos metabólicos de las plantas, registrándose temperaturas foliares más bajas. Un grupo de genotipos casi no creció de los 45 a los 75 días después de la siembra, otros crecieron más del doble. A los 100 días después de la siembra, tres genotipos incrementaron la clorofila, el resto la disminuyó. Hubo genotipos que se marchitaron más de los 75 a los 100 días después de la siembra, otros mantuvieron su turgencia y otros la mejoraron. Se observó correlación negativa entre la altura de planta y el grado de marchitez a los 75 días después de la siembra. A los 100 días la clorofila también se correlacionó negativamente con el grado de marchitez. Los procedimientos utilizados para las determinaciones morfológicas y fisiológicas, constituyeron una forma confiable, sencilla y de bajo costo para estudiar el efecto de la sobresaturación de humedad en cada una de ellas, y en conjunto las diferentes respuestas de los genotipos al estrés en campo.

LITERATURA CITADA

Andreeva, I. N.; Svaradzh, K.; Kozlova, G. I.; Raikhman, L. A., 1987: Changes in ultrastructure and nitrogen-fixing activity of soyabean nodules under the influence of flooding. *Russ. J. Plant Physiol.* 34: 528-536.

- Ascencio L., G., y N. Maldonado M. 1998. Crecimiento y desarrollo de la soya en el sur de Tamaulipas, México. *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 24: 99-110.
- Ascencio L., G., N. Maldonado Moreno., J. G. García O. and H. R. Gill L. 2013. AMMI and sequential path analyses of soybean [*Glycine max.* (L.) Merrill] experimental lines in a breeding program in the mexican tropics. *Aust. J. Crop Sci.* 7: 1772-1779.
- Balota, M. Payne, W. A. Evett, S. R. and Lazar, M. D. 2007. Canopy temperature depression sampling to assess grain yield and genotypic differentiation in winter wheat. *Crop Sci.* 47: 1518-1529.
- Bacanamwo, M., and Purcell, L. C. 1999. Soybean root morphological and anatomical traits associated with acclimation to flooding. *Crop Sci.* 39: 143-149.
- Boru, G., Vantoi, T., Alves, J., Hua, D., & Knee, M. 2003. Responses of soybean to oxygen deficiency and elevated root-zone carbon dioxide concentration. *Ann. Bot.* 91: 447-453.
- Feng, Baili. Yu, H. Hu, Y. Gao, X. Gao, J. Gao, D and Zhang S. 2009. The physiological characteristics of the low canopy temperature wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under simulated drought condition. *Acta Physiol. Plant* 31:1229-1235.
- Fischer, R. A., D. Reed, K. D. Sayre, Z.-M. Lu, A. G. Condon, and A. Larque Saavedra. 1998. Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies. *Crop Sci.* 38:1467-1475.

- Fundora, Z., R. López, M. Hernández, I. Ravelo, J. López y A. Sánchez. 2003. Evaluación agronómica de germoplasma de soya (*Glycine max* L. Merr.) en Cuba. *Agron. Mesoam.* 14: 79 – 84.
- Grassini, P., G.V. Indaco, M. López, A.J. Hall and N. Trápani. 2006. Responses to short-term waterlogging during grain filling in sunflower. *Field Crops Res.* 101: 352-363.
- Gutierrez, B. F. H., R. S. Lavado y C. A. Porcelli. 1996. Note on the effects of winter and spring waterlogging on growth, chemical composition and yield of rapeseed. *Field Crops Res.* 47: 175-179.
- Henshaw, T. L., Gilbert, R. A., Scholberg, J. M. S., and Sinclair, T. R. 2007. Soya bean (*Glycine max* L. Merr.) genotype response to early-season flooding: II. Aboveground growth and biomass. *J. Agron. Crop Sci.* 193: 189-197.
- Jitsuyama, Y. 2013. Responses of japanese soybeans to hypoxic condition at rhizosphere were different depending upon cultivars and ambient temperatures. *Am. J. Plant Sci.* 4: 1297.
- King, C., A., Purcell, L. C. and Brye, K. R. 2009. Differential wilting among soybean genotypes in response to water deficit. *Crop Sci.* 49: 290–298.
- Koppitz, H. 2004. Effects of flooding on the amino acid and carbohydrate patterns of *Phragmites australis*. *Limnologica* 34: 37-47.
- Ma, B. L., Morrison, M. J., and Voldeng, H. D. 1995. Leaf greenness and photosynthetic rates in soybean. *Crop Sci.* 35:1411-1414.

- Maldonado M., N., G. Ascencio L., G. Espinosa V., y M. de los A. Peña del R. 2013. Estrategias tecnológicas para contrarrestar la sequía en la producción de soya en el sur de Tamaulipas. INIFAP. México. 65 p.
- Milroy, S.P., M.P. Bange and P. Thongbai. 2009. Cotton leaf nutrient concentrations in response to waterlogging under field conditions. *Field Crops Res.* 113: 246-255.
- Oosterhuis, D. M., Scott, H. D., Hampton, R. E., and Wullschleger, S. D. 1990. Physiological responses of two soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] cultivars to short-term flooding. *Environ. Exp. Bot.* 30: 85-92.
- Palta, J. A., A. Ganjeali, N. C. Turner, K. H. M. Siddique. 2010. Effects of transient subsurface waterlogging on root growth, plant biomass and yield of chickpea. *Agric. Water Manage* 97: 1469-1476.
- Pezeshki, S. R. 1994. Plant responses to flooding. *In*: Wilkinson, R. E. (ed). *Plant Environment Interactions*. Marcel Dekker Inc., New York. pp. 289-312.
- Quispe S., M., A. Muñoz O., M. Velázquez J., y G. Martínez A. 1994. Selección de genotipos de arroz (*Oriza sativa* L.). *Agrociencia* 5: 79-90.
- Reicosky, D. C., Meyer, W. S., Schaefer, N. L., and Sides, R. D. 1985. Cotton response to short-term waterlogging imposed with a water-table gradient facility. *Agric. Water Management* 10: 127-143.

- Sairam, R. K., K. Dharmar, V. Chinnusamy and R. C. Meena. 2008. Waterlogging-induced increase in sugar mobilization, fermentation, and related gene expression in the roots of mung bean (*Vigna radiata*). *J. Plant Physiol.* 166: 602-616.
- Sallam, A., and Scott, H. D. 1987. Effects of prolonged flooding on soybeans during early vegetative growth. *Soil Sci.* 144: 61-66.
- Sung F., J. M. 1993. Waterlogging effect on nodule nitrogenase and leaf nitrate reductase activities in soybean. *Field Crops Res.* 35: 183–189.
- VanToai, T., Y. Yang, P. Ling, G. Boru, M. Karica, V. Roberts, D. Hua, B. Bishop. 2003. Monitoring soybean tolerance to flooding stress by image processing technique. *In* T. VanToai *et al.* (ed). *Digital imaging and spectral techniques: applications to precision agriculture and crop physiology.* ASA, Special publication No. 66. The American Society of Agronomy. Madison, WI. pp. 43-51.
- VanToai, T., Hoa, T. C., Hue, N. N., Nguyen, H. T., Shannon, J. G., and Rahman, M. A. 2010. Flooding tolerance of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] germplasm from Southeast Asia under field and screen-house environments. *Open Agric. J.* 4: 38-46.
- Yong-Zhong L., T. Bin, Z. Yong-Lian, M. Ke-Jun, X. Shang-Zhong and Q. Fa-Zhan. 2010. Screening methods for waterlogging tolerance at maize (*Zea mays* L.) seedling stage. *Agric. Sci. China* 9: 362-369.
- Zheng, C., Jiang, D., Liu, F., Dai, T., Jing, Q., and Cao, W. 2009. Effects of salt and waterlogging stresses and their combination on leaf photosynthesis, chloroplast ATP synthesis, and antioxidant capacity in wheat. *Plant Sci.* 176: 575-582.

CAPÍTULO IV

RESISTENCIA A FACTORES ABIOTICOS EN SOYA: EFECTO DEL EXCESO DE HUMEDAD SOBRE EL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES

Julio César García Rodríguez, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2014

RESUMEN

La inundación tiene un efecto negativo sobre la mayoría de plantas debido a que reduce su crecimiento. En soya, las altas precipitaciones pueden reducir el rendimiento drásticamente. Para conocer el efecto de dos niveles de exceso de humedad: suelo sin sobresaturación de humedad y suelo con sobresaturación de humedad debido a la aplicación de un riego más el exceso de lluvia, sobre el rendimiento y sus componentes en 25 genotipos de soya, se estableció un experimento en el sur de Tamaulipas, durante el ciclo primavera-verano 2013. La conductancia estomática a los 45 días después de la siembra se redujo en sobresaturación de humedad, pero no trascendió a la etapa reproductiva de las plantas, ya que la altura a R2, el peso de 100 semillas y el rendimiento fueron superiores en la misma condición. Los genotipos con el mayor índice de selección fueron: H98-1052, H98-1325, H06-0560, H06-1192 y H10-0242; la altura de planta a R2, el número de ramas planta⁻¹, el número de plantas cosechadas y el número de vainas planta⁻¹ contribuyeron en mayor grado a éste. Destacó del grupo H10-0242 por registrar el rendimiento más alto, el cual se correlacionó solamente con el número de entrenudos a R7. El 50 % de los genotipos aumentaron el número de plantas cosechadas en suelo sobresaturado, el resto lo disminuyó. Un grupo de cuatro genotipos bajaron el peso de 100 semillas con exceso de humedad, los otros genotipos lo incrementaron. H98-1325 mostró mayor proporción de efectos específicos al exceso de humedad,

mantuvo su rendimiento tanto sin estrés como con estrés. El efecto del exceso de humedad fue poco significativo, ya que el estrés se presentó durante la fase vegetativa y la sobresaturación ocurrió por un periodo corto.

Palabras clave: *Glycine max* L. (Merr.), resistencia genética, anoxia, hipoxia, rendimiento y sus componentes.

INTRODUCCIÓN

La inundación tiene un efecto negativo sobre la mayoría de plantas terrestres debido a que reduce su crecimiento e induce la senescencia. La deficiencia de O₂, efecto principal de la inundación, cambia el metabolismo de la planta induciendo la vía anaeróbica o fermentativa como mecanismo alternativo, aunque poco eficiente para la producción de energía (De la Cruz *et al.*, 2012). Los daños causados por la falta de O₂ son más severos en verano que en invierno, ya que en condiciones cálidas la demanda de O₂ metabólico por las plantas es mayor. No obstante, las plantas tienen una amplia gama de mecanismos para escapar a los daños de la hipoxia o anoxia, como el desarrollo de tejidos de aireación o aerénquima (Crawford, 2003).

Con la falta de O₂ en el suelo se generan formas reducidas de N, P, Mn, Fe o S que pueden modificar la solubilidad del elemento (Unger *et al.*, 2009) afectando su disponibilidad (Taiz y Zeiger, 2006). La difusión del O₂ en suelos inundados es muy baja, aproximadamente 10,000 veces menos que en el aire (Koppitz, 2004), y el intercambio de gases entre la raíz sumergida y el ambiente es muy limitado. Según Kozlowski (1984), el primer síntoma de daños por anegación es un cierre estomático. Con el cierre de los estomas, la absorción pasiva de agua por la planta disminuye, a lo que se añade la disminución de la absorción activa por falta de O₂ en el cortex radicular. Asimismo, el movimiento del agua a distancia, vía xilema, mayormente por flujo en

masa, también decrece. El descenso de la transpiración conlleva un marchitamiento de las hojas y una senescencia precoz que acaba con su caída.

En soya, el exceso de humedad en el suelo puede reducir el rendimiento drásticamente, la reducción puede ser del 17 al 43 % si la inundación se presenta en la etapa vegetativa del cultivo, y del 50 al 56 % si se presenta en la etapa reproductiva (Oosterhuis *et al.*, 1990; Scott *et al.*, 1990). Estas pérdidas se dan por el efecto de la humedad sobre el crecimiento de la raíz y la nodulación, la fijación de nitrógeno, la fotosíntesis, llevando incluso las plantas a la muerte debido a las enfermedades y al estrés fisiológico en condiciones severas de inundación (Schmitthenner, 1985; Salam y Scott, 1987).

La adaptación de la soya a condiciones de anegamiento depende de la fijación de N_2 por las raíces adventicias y formación de aerénquima (Bacanamwo y Purcell, 1999). El aerénquima lisígeno contribuye en la habilidad de la planta para tolerar suelo con deficiencia de O_2 , proporcionando un sistema de transferencia del O_2 a partir del tallo (Drew *et al.*, 2000).

De acuerdo con Scott *et al.* (1989), las inundaciones constituyen un problema común para la producción de soya en Luisiana y otros estados del sureste de Estados Unidos. Esto es debido a fuertes lluvias y pobre drenaje en áreas con suelos arcillosos; la inundación de un campo por dos días o más, baja la tasa de crecimiento y potencialmente causa el detrimento del rendimiento (Riche, 2004).

En México, la soya se cultiva generalmente en zonas tropicales y subtropicales, donde en años con precipitaciones excesivas a través de su ciclo de producción, efecto del cambio climático, el cultivo se ve sometido a estrés por exceso de humedad, causando pérdidas económicas para los productores por disminución en el rendimiento. En el sur de Tamaulipas, región con mayor

superficie dedicada a la siembra de soya y donde predominan los suelos vertisoles, tanto la sequía como altos niveles de humedad por lluvias extremas, constituyen los factores abióticos más importantes que afectan la producción de dicha oleaginosa.

El objetivo de esta investigación fue conocer el efecto del exceso de humedad en el suelo sobre el rendimiento y sus componentes en el cultivo de la soya.

MATERIALES Y MÉTODOS

La información referente a la localización y establecimiento del experimento, las condiciones climáticas, la lista de los genotipos y las labores de manejo se consignan en el apartado “materiales y métodos” del capítulo III.

Para conocer el efecto de los niveles de exceso de humedad se adaptó el modelo 1 de resistencia a sequía propuesto por Muñoz (1992), representado por: $Y = G + A + G*A$, donde Y es la variación total, G la variación del efecto del genotipo, A la variación del efecto de la humedad y $G*A$ es la interacción. En este caso los niveles de A fueron: suelo sin sobresaturación de humedad (A0) y suelo con sobresaturación de humedad debido a la aplicación de un riego más el exceso de lluvia ocurrida en septiembre (A1).

Se midió: conductancia estomática a los 45 días después de la siembra (CE45), altura de planta a R2 (AR2), número de entrenudos a R7 (ER7), plantas cosechadas (PLC), ramas planta⁻¹ (RxP), vainas planta⁻¹ (VxP), semillas planta⁻¹ (SxP), peso de 100 semillas (P100S) y rendimiento (REND). Para la CE45 se utilizó el Leaf Porometer SC-1 (Decagon Devices Inc.). Las variables AR2, ER7, RxP, VxP y SxP se tomaron en tres plantas al azar. Además se contabilizaron los días a R2 (floración completa) y a R8 (maduración completa) de cada genotipo.

Se efectuaron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$) para conocer el efecto de A y G. Adicionalmente se determinó un índice de selección (IDS), de acuerdo con el procedimiento propuesto por Quispe *et al.* (1994). Se calcularon las correlaciones para conocer el grado de asociación entre las variables. Las interacciones de G*A sobre el REND se graficaron para conocer los efectos específicos al exceso de humedad, de acuerdo con el método de Muñoz (1974).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de variación se presenta en el Cuadro 1, observándose efecto de G en la mayoría de las variables, mientras que S sólo afectó cuatro características y la interacción dos.

Cuadro 1. Análisis de variación del rendimiento y sus componentes en 25 genotipos de soya evaluados en dos niveles de exceso de humedad.

Factores	GL	CE45	AR2	ER7	PLC	RxP	VxP	SxP	P100S	REND
A	1	625238.1**	153.7**	2.6 ns	24.0 ns	0.09 ns	36.2 ns	94.4 ns	16.0**	871982.4**
G	24	14477.3 ns	56.7**	3.7**	1232.7**	1.4**	92.8**	252.3*	10.8**	314481.3**
G*A	24	13372.5 ns	7.0 ns	1.5 ns	121.0**	0.23 ns	18.2 ns	90.6 ns	1.8**	43107.9 ns
CV		8.3	8.6	10.6	14.6	4.3	18.6	18.4	5.9	13.5

*, ** Significancia al 0.05 y 0.01 % respectivamente; ns = No significativo; GL = Grados de libertad; CV = Coeficiente de variación.

Efecto de los niveles de exceso de humedad sobre la conductancia estomática, altura a R2, peso de 100 semillas y rendimiento

Aunque la CE45 se redujo en A1, fue en esta condición donde se tuvieron los valores mayores de AR2, P100S y REND (Figura 1). Mientras que el cierre de estomas fue menor 12.4 % en la condición de sobresaturación de humedad, el aumento en las otras tres variables fue de 9.12, 5.5 y 11.4 % respectivamente, indicando que dicho efecto no trascendió a la etapa reproductiva del cultivo.

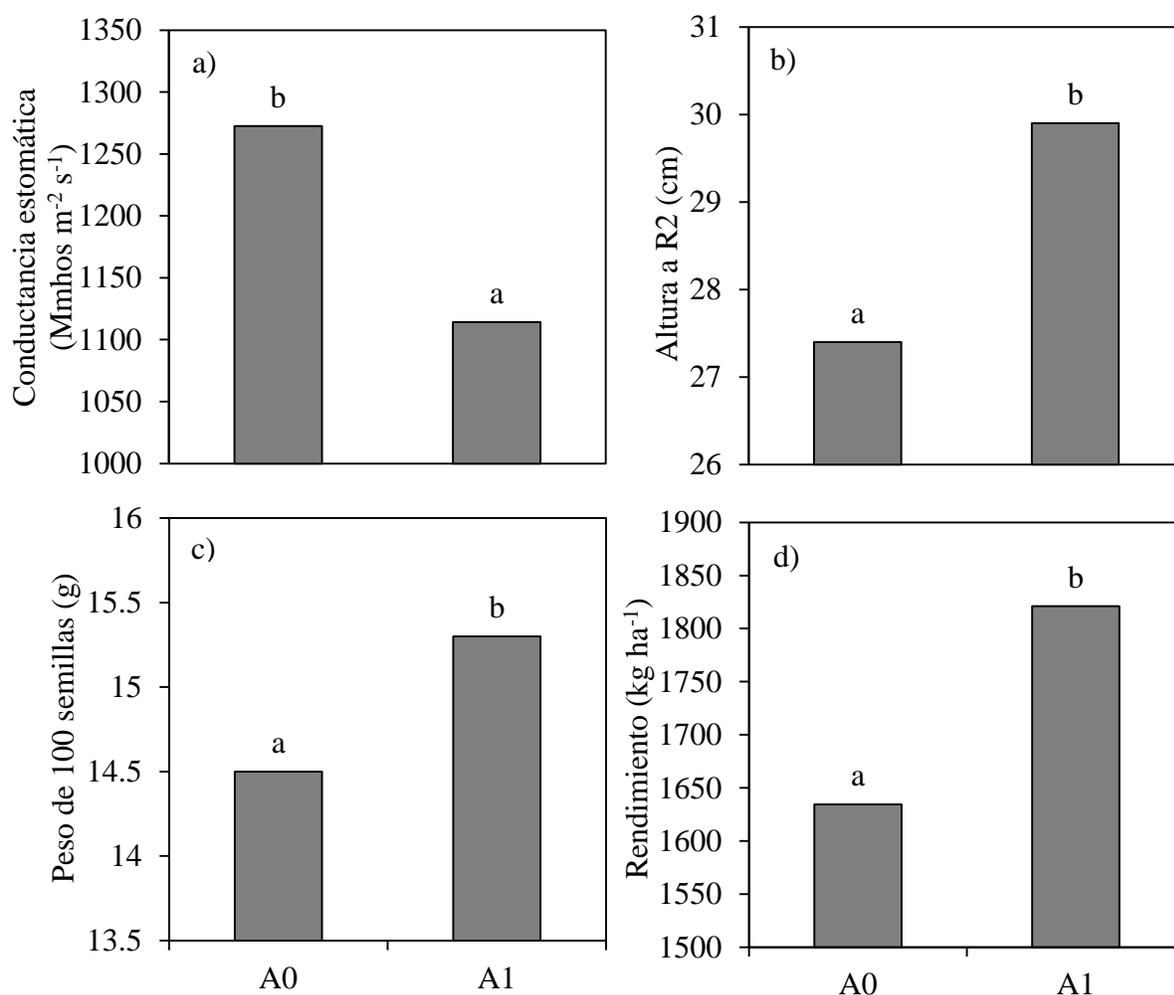


Figura 1. Efecto de los niveles de exceso de humedad sobre: a) conductancia estomática, b) altura de planta a R2, c) peso de 100 semillas y d) rendimiento en 25 genotipos de soya.

A0 = Sin sobresaturación de humedad; A1 = Con sobresaturación de humedad.

Este contraste indicó una fuerte sensibilidad del estoma al exceso de humedad con efecto sobre el proceso transpiratorio. Al respecto, Bradford y Hsiao (1982) y Riche (2004) mencionaron que una respuesta temprana de las plantas sometidas a inundación es el cierre de los estomas, que en este caso no necesariamente fue indicio de reducción en el REND y algunos de sus componentes, lo cual puede atribuirse a un anegamiento mayor por efecto de la pendiente en A1, durante el periodo de acumulación de más lluvia que fue corto. Posteriormente cesaron las precipitaciones torrenciales y varios días dejó de llover, el anegamiento se despejó desapareciendo el efecto del exceso de humedad. Por lo que la aplicación del riego en A1 promovió las características de REND durante la etapa reproductiva de la planta.

En cuanto al REND, Oosterhuis *et al.* (1990) concluyeron que la disminución de éste es mayor cuando las condiciones de hipoxia se presentan en la etapa reproductiva que cuando se presentan en etapa vegetativa, y en esta evaluación, el exceso de humedad ocurrió precisamente durante la segunda. Por su parte, VanToai *et al.* (2010) encontraron reducciones en el REND de 62.2 % por efecto de inundación por dos semanas y de 73.9 % cuando la inundación duró más tiempo.

Efecto del genotipo sobre el rendimiento y sus componentes, e índice de selección

Fueron cinco genotipos los que obtuvieron el mayor IDS al ser superiores y diferentes en seis de las siete variables evaluadas: H98-1052, H98-1325, H06-0560, H06-1192 y H10-0242 (Cuadro 2). Las variables que más contribuyeron al IDS fueron: AR2, RxP, PLC y VxP.

No todos los genotipos sobresalientes en el REND tuvieron altos IDS. Destacó H10-0242 como el que registró mayor REND dentro del grupo superior en esta variable, el cual también destacó en AR2, ER7, RxP, PLC y VxP; mientras que del grupo con menor desempeño, H06-

0589 obtuvo el REND más bajo (Figura 2). Sin embargo, cuatro de los cinco genotipos con mayor IDS figuraron dentro del grupo con mayor REND (Cuadro 2, Figura 2).

Cuadro 2. Matriz del índice de selección en 25 genotipos de soya evaluados ignorando los niveles de exceso de humedad.

Variable	Genotipos																								
	H02-2091	H06-0589	H02-1123	Tamesí	H98-1021	H06-1637	Huasteca 400	H02-2331	H02-2224	Huasteca 300	H02-2309	H98-1240	H10-0556	H06-0698	H02-2248	H02-1656	H02-1991	H02-1337	H02-2295	Huasteca 200	H98-1052	H98-1325	H10-0242	H06-0560	H06-1192
AR2	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
ER7	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1
RxP	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
PLC	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
VxP	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P100S	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
REND	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
IDS	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6

AR2 = Altura de planta a R2; ER7 = Entrenudos a R7; RxP = Ramas por planta; PLC = Plantas cosechadas; VxP = Vainas por plantas; P100S = Peso de 100 semillas; REND = Rendimiento; IDS = Índice de selección.

De acuerdo con el análisis de correlación, el REND estuvo asociado solamente con el número de ER7 ($r = 0.445$, $p \leq 0.05$), éste no se correlacionó con los días a R2 de los genotipos. Linkermer *et al.* (1998) encontraron que la pérdida de REND por efecto de la inundación se debió en primera

instancia a una baja producción de vainas, que resultó de una reducción en el número de vainas nudo⁻¹. La correlación más fuerte se dio entre VxP con SxP ($r = 0.917$, $p \leq 0.0001$).

También se correlacionaron positivamente: RxP con VxP ($r = 0.450$, $p \leq 0.05$) y RxP con SxP ($r = 0.436$, $p \leq 0.05$); mientras que asociaciones negativas se presentaron entre RxP y P100S ($r = -0.432$, $p \leq 0.05$), PLC con SxP ($r = -0.407$, $p \leq 0.05$) y SxP con P100S ($r = 0.440$, $p \leq 0.05$), sugiriendo que el peso del grano se redujo por una alta cantidad de RxP y de SxP, y que la baja en el número de SxP se debió a un aumento en el número de PLC.

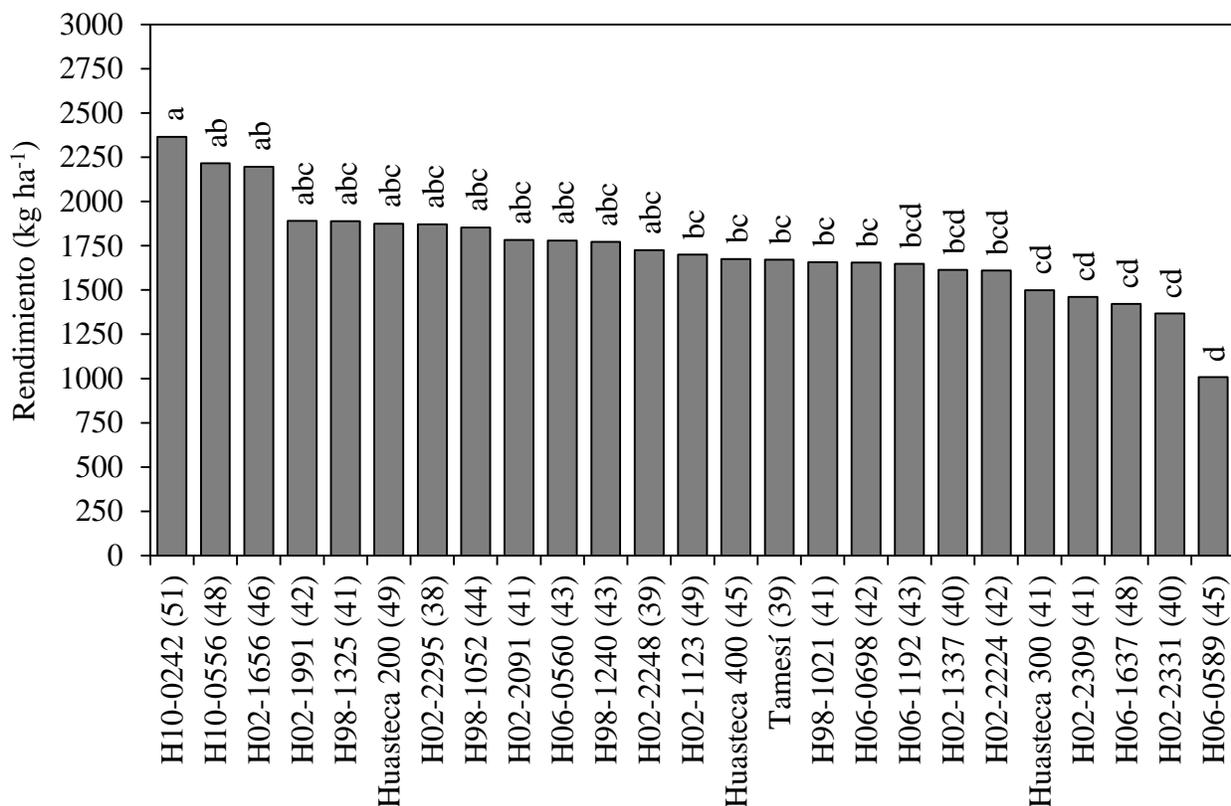


Figura 2. Variación genotípica en el rendimiento ignorando los niveles de exceso de humedad.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

Medias con la misma letra entre genotipos no son diferentes.

Efecto de la interacción niveles de exceso de humedad por genotipos sobre las plantas cosechadas y el peso de 100 semillas

Aproximadamente el 50 % de los genotipos incrementaron el número de PLC en el suelo con sobresaturación de humedad (valores negativos), y los restantes lo disminuyeron en la misma condición (valores positivos) (Figura 3), mostrando la propensión de unos para continuar su desarrollo aún con exceso de agua y la susceptibilidad de otros para detener su crecimiento.

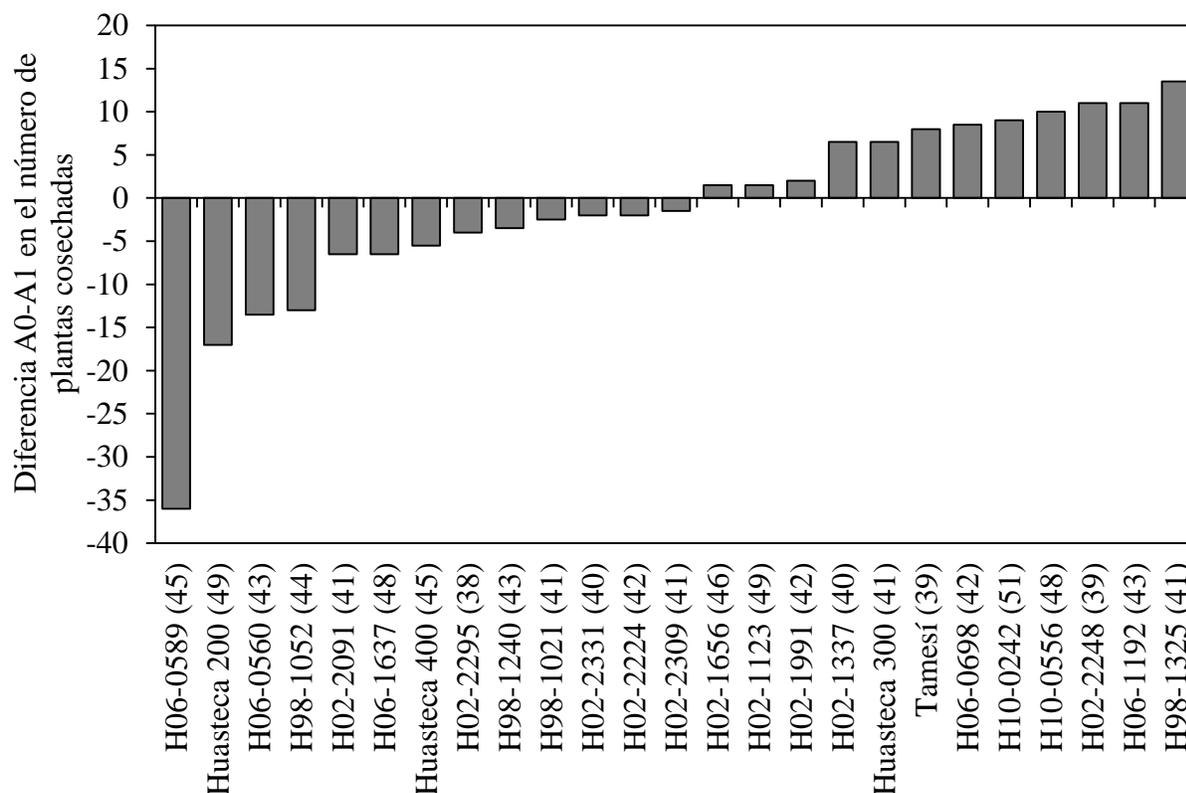


Figura 3. Diferencias (A0-A1) en el número de plantas cosechadas en 25 genotipos de soya. Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

El coeficiente de correlación entre las diferencias A0-A1 en el número de PLC y los días a R2 de los genotipos no resultó significativo, indicando que dicho comportamiento no estuvo asociado con su ciclo fenológico.

Al igual que se detectaron efectos específicos de los genotipos al exceso de humedad en el número de PLC, en el P100S la respuesta también fue diferente en función de la acumulación de agua en el suelo. Un grupo mayoritario de genotipos incrementó el P100S en A1 (valores negativos), mientras que cuatro genotipos lo disminuyeron (valores positivos) (Figura 4). Tampoco se asociaron los días a R2 con la diferencia en el peso de 100 semillas, ni las diferencias A0-A1 en el número de PLC con las diferencias A0-A1 con el peso de 100 semillas.

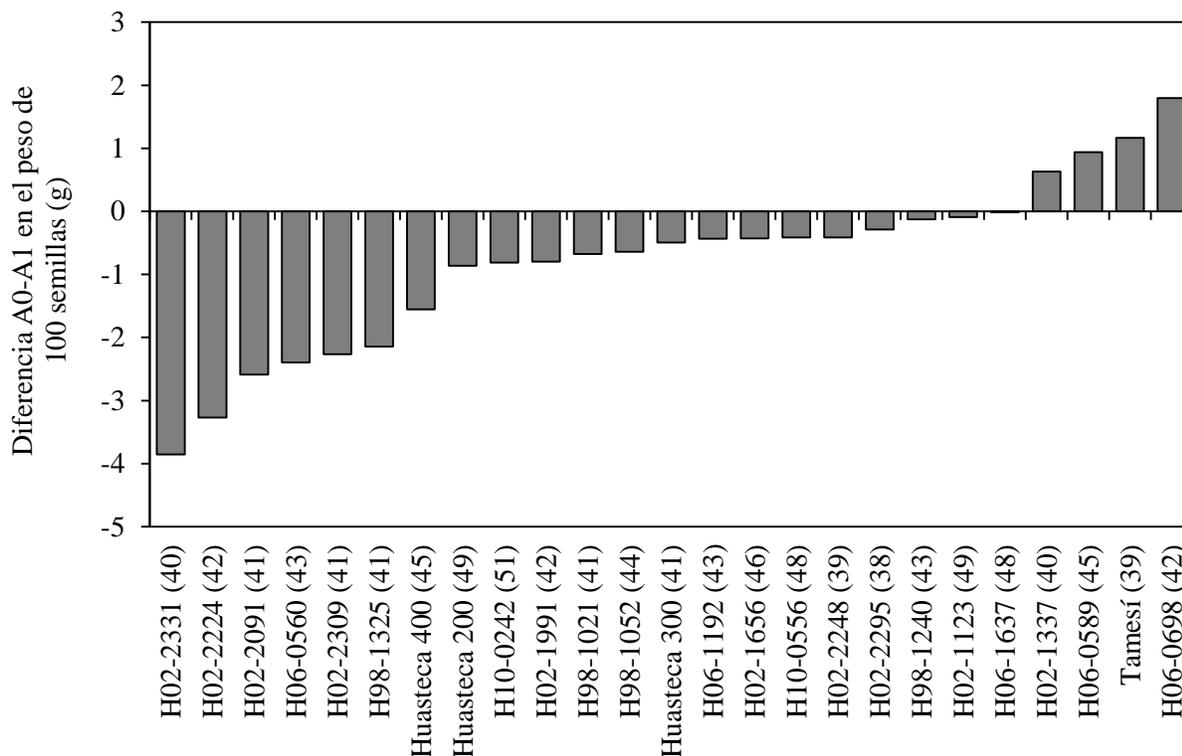


Figura 4. Diferencias (A0-A1) en el peso de 100 semillas en 25 genotipos de soya.

Entre paréntesis se muestran los días a R2 de cada genotipo.

Selección de genotipos por resistencia a exceso de humedad en el suelo

El 20 % de los genotipos seleccionados por mayor IDS de acuerdo a efectos genéticos genéricos según el modelo adaptado de Muñoz (1992) lo constituyeron: H98-1052, H98-1325, H10-0242, H06-0560 y H06-1192. Sin embargo, H98-1325 acumuló mayor proporción de

efectos específicos al exceso de humedad, ya que en comparación con los otros genotipos, su REND fue casi igual tanto en sobresaturación como sin sobresaturación (Figura 5).

Destacó H10-0242 como el más rendidor tanto en condiciones sobresaturadas de humedad como en el suelo que acumuló sólo la humedad de la lluvia; H02-1991 fue el único que disminuyó el REND al pasar de A0 a A1 (Figura 5).

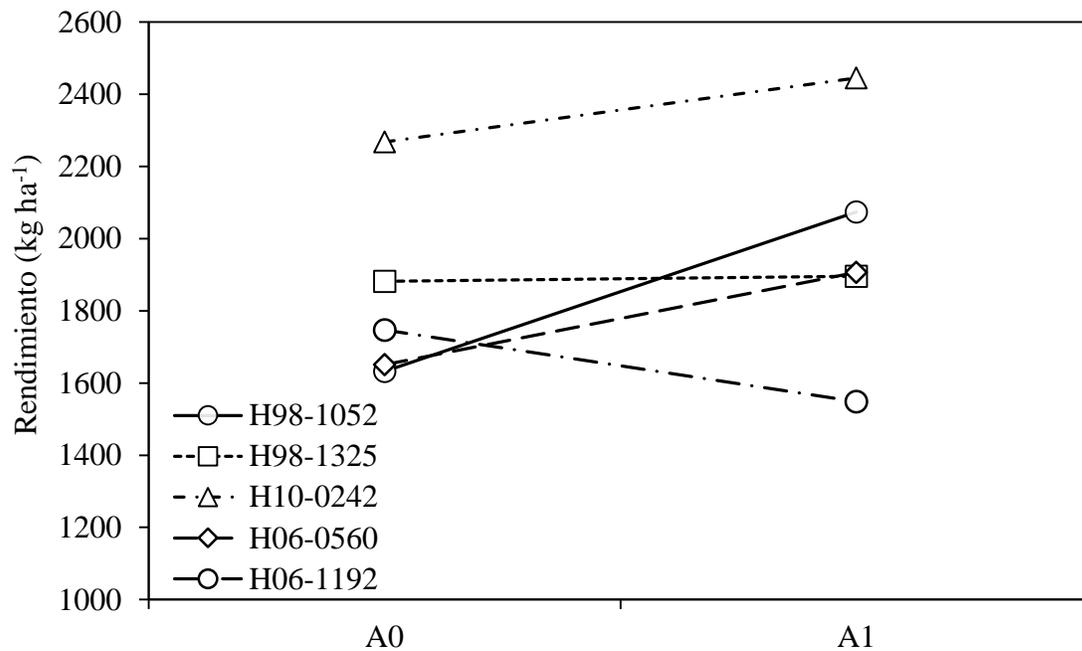


Figura 5. Efecto de la interacción niveles de exceso de humedad por genotipos sobre el rendimiento de los genotipos de soya seleccionados con base en mayor índice de selección.

A0 = Sin sobresaturación de humedad; A1 = Con sobresaturación de humedad.

En el sudeste de Asia, las variedades de soya VND2, Nam Vang y ATF15-1 resultaron las más tolerantes al estrés por inundación considerando el REND, las cuales mostraron mayor estabilidad tanto en experimentos de campo como en invernadero (VanToai *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

La conductancia estomática a los 45 días después de la siembra se redujo en sobresaturación de humedad, lo cual no afectó a las plantas en la etapa reproductiva por el periodo corto de inundación y un lapso de días sin lluvia posterior al anegamiento. La altura de la planta a R2, el peso de 100 semillas y el rendimiento fueron superiores en la misma condición. Los genotipos con el mayor índice de selección fueron: H98-1052, H98-1325, H06-0560, H06-1192 y H10-0242. La altura de planta a R2, el número de ramas planta⁻¹, el número de plantas cosechadas y el número de vainas planta⁻¹ contribuyeron en mayor proporción a éste. Destacó del grupo H10-0242 por registrar el rendimiento más alto, el cual se correlacionó con el número de entrenudos a R7. El 50 % de los genotipos aumentaron el número de plantas cosechadas en suelo sobresaturado, el resto lo disminuyó. Un grupo de cuatro genotipos bajaron el peso de 100 semillas con exceso de humedad, los otros genotipos lo incrementaron. Del 20 % de genotipos con mayor índice de selección de acuerdo a efectos genéricos, H98-1325 mostró mayor proporción de efectos específicos al exceso de humedad, al mantener el rendimiento al pasar de la condición sin estrés a la condición con estrés. El efecto poco significativo del exceso de humedad demostró la capacidad de la soya para reponerse a dicho estrés, ya que éste se dio en mayor proporción durante la fase vegetativa y la sobresaturación se presentó en un periodo corto.

LITERATURA CITADA

- Bacanamwo, M., and Purcell, L. C. 1999. Soybean root morphological and anatomical traits associated with acclimation to flooding. *Crop Sci.* 39: 143-149.
- Bradford, K. J., and Hsiao, T. C. 1982. Stomatal behavior and water relations of waterlogged tomato plants. *Plant Physiol.* 70: 1508-1513.

- Crawford, R., M. 2003. Seasonal differences in plant responses to flooding and anoxia. *Can. J. Bot.* 81: 1224-1246.
- De la Cruz, J. J., Moreno, L. P., y Magnitskiy, S. 2013. Respuesta de las plantas a estrés por inundación. Una revisión. *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.* 6: 96-109.
- Drew, M. C., He, C. J., and Morgan, P. W. 2000. Programmed cell death and aerenchyma formation in roots. *Trends Plant Sci.* 5: 123-127.
- Kozłowski, T., T. 1984. Flooding and plant growth. Academic Press. London. 356 p.
- Koppitz, H. 2004. Effects of flooding on the amino acid and carbohydrate patterns of *Phragmites australis*. *Limnologica* 34: 37-47.
- Linkemer, G., Board, J. E., and Musgrave, M. E. 1998. Waterlogging effects on growth and yield components in late-planted soybean. *Crop Sci.* 38: 1576-1584.
- Muñoz O., A. 1974. Tamaño de la parcela, diseño y usos de los factoriales en la experimentación agrícola. Folleto Misceláneo No. 25. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, SAG. México. 38 p.
- Oosterhuis, D. M., Scott, H. D., Hampton, R. E., and Wullschleger, S. D. 1990. Physiological responses of two soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] cultivars to short-term flooding. *Environ. Exp. Bot.* 30: 85-92.
- Quispe S., M.; A. Muñoz, O., M. Velázquez J., y G. Martínez A. 1994. Selección de genotipos de arroz (*Oriza sativa* L.). *Agrociencia* 5: 79-90.

- Riche, C. J. 2004. Identification of soybean cultivars tolerance to waterlogging through analyses of leaf nitrogen concentration. Doctoral thesis. Louisiana State University. USA. 36 p.
- Sallam, A., and Scott, H. D. 1987. Effects of prolonged flooding on soybeans during early vegetative growth. *Soil Sci.* 144: 61-66.
- Scott, H. D., DeAngulo, J., Daniels, M. B., and Wood, L. S. 1989. Flood duration effects on soybean growth and yield. *Agron. J.* 81: 631-636.
- Scott, H. D., De Angulo J., Wood L. S., Pitts D. J. 1990. Influence of temporary flooding at three growth stages on soybean growth on a clayey soil. *J. Plant Nutrit.* 13: 1045-1071.
- Schmitthenner, A. F. 1985. Problems and progress in control of *Phytophthora* root rot of soybean. *Plant Dis.* 69: 362-368.
- Taiz, L., y E. Zeiger. 2006. *Fisiología Vegetal*. Universitat Jaume I. Castellón de la Plana, España. 1336 p.
- Unger, I. M., A. C. Kennedy, and R. M. Muzika. 2009. Flooding effects on soil microbial communities. *Appl. Soil Ecol.* 42: 1-8.
- VanToai, T., Hoa, T. C., Hue, N. N., Nguyen, H. T., Shannon, J. G., and Rahman, M. A. 2010. Flooding tolerance of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] germplasm from Southeast Asia under field and screen-house environments. *Open Agric. J.* 4: 38-46.

CAPÍTULO V

RESISTENCIA A FACTORES ABIOTICOS EN SOYA: RESPUESTA GENOTÍPICA AL ESTRÉS POR CALOR EN ESTADO DE PLÁNTULA

Julio César García Rodríguez, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2014

RESUMEN

El estrés por calor es un problema en la agricultura de muchas zonas del mundo. La soya es afectada por el incremento de temperatura por arriba de su umbral térmico. Con el fin de conocer la respuesta de 21 genotipos de soya a altas temperaturas en etapa de plántula, se estableció un ensayo bajo condiciones de invernadero en Montecillo, Texcoco, Edo. de México. Se evaluaron cuatro niveles de temperatura: 1) 50 ± 1 °C, 2) 54 ± 1 °C, 3) 58 ± 1 °C y 4) 62 ± 1 °C sobre las mismas plántulas, por periodos de dos horas. La aplicación de 50 ± 1 °C no causó marchitamiento, pero se observaron diferencias entre genotipos en el grado de cierre de las hojas; seis genotipos fueron totalmente insensibles y H98-1240 cerró totalmente sus hojas. Entre niveles de temperatura, la aplicación de 62 ± 1 °C causó el mayor marchitamiento; mientras que entre genotipos, 15 obtuvieron un bajo grado de marchitez, destacando H02-1337, H98-1240 resultó el más afectado por el estrés. De los genotipos seleccionados por efectos genéricos, H02-2248 aumentó en menor proporción el grado de marchitez entre los dos niveles de mayor calor. La respuesta de los genotipos al riego de recuperación mostró que hubo genotipos cuyas hojas se marchitaron en mayor grado y genotipos que se marchitaron menos, sin embargo la variabilidad se debió más bien a efectos aleatorios. Los resultados anteriores sugieren que la selección de genotipos de soya resistentes a altas temperaturas por medio de la aplicación de aire caliente en

estado de plántula, constituye una técnica sencilla y confiable con la cual se pueden obtener resultados en poco tiempo.

Palabras clave: *Glycine max* L. (Merr.), termotolerancia, estrés por calor, estado de plántula.

INTRODUCCIÓN

Las altas temperaturas pueden desencadenar una serie de cambios morfo-anatómicos, fisiológicos y bioquímicos en las plantas, que afectan su crecimiento y desarrollo, causando una reducción drástica en el rendimiento. El estrés por calor se define a menudo como un aumento en la temperatura durante un periodo suficiente de tiempo para causar daños irreversibles en el crecimiento y desarrollo de las plantas. La elevación de la temperatura, por lo general de 10 a 15 °C por encima de la temperatura ambiente, es considerada como estrés. Sin embargo, el estrés por calor es un factor complejo que depende de la intensidad, la duración y la tasa de aumento de la temperatura (Wahid *et al.*, 2007).

García y Muñoz (2013)⁸ utilizaron un modelo para el análisis de información meteorológica con datos históricos, con el fin de conocer el estatus del sur de Tamaulipas, región con mayor producción de soya en México, en relación al cambio climático, observándose que los patrones de comportamiento en cuanto a temperatura están cambiando, además de los de precipitación. La temperatura máxima se está incrementando entre 1.5 y 2 °C aproximadamente en el periodo de 1976 a 2009, en relación con el periodo 1961-1975. Además se encontraron años atípicos donde se observaron golpes de calor por arriba de los 38 °C. De acuerdo con Wahid *et al.* (2007), los

⁸ García R., J. C. Estudiante de Maestría en Genética del Colegio de Postgraduados (julio.garcia@colpos.mx); Muñoz O., A. Profesor investigador titular en el Programa de Recursos Genéticos y Productividad-Genética del Colegio de Postgraduados (amunozo@colpos.mx).

efectos adversos del estrés por calor pueden ser mitigados mediante el desarrollo de variedades cultivadas con mejor termotolerancia, utilizando diversos enfoques genéticos.

Tolerancia al calor es la capacidad de la planta para crecer y producir rendimiento económico en condiciones de altas temperaturas. Mientras que algunos investigadores creen que las temperaturas nocturnas son las que limitan el desarrollo de las plantas, otros han argumentado que las temperaturas del día y la noche no afectan de forma independiente y que la temperatura diurna promedio es mejor para predecir la respuesta de las plantas al incremento del calor (Peet y Willits, 1998). Según Sullivan (1972), aunque la tolerancia al incremento en la temperatura normal involucra mecanismos complejos de resistencia, uno de los mecanismos principales es la termoestabilidad de la membrana celular (Martineau *et al.*, 1979). A nivel molecular, la expresión de un grupo de proteínas, llamadas de choque térmico (HSP por sus siglas en inglés), juegan un rol importante en la adquisición de la termotolerancia en las plantas (Alexandrov, 1994).

En el caso de la soya, además de ser sensible al fotoperiodo, Allen y Boote (2000) reportaron que es sensible a la temperatura. La soya crece y se desarrolla con temperaturas óptimas de 25-30 °C (Raper y Kramer, 1987; Maldonado *et al.*, 2013), pero entre los 33 y 40 °C reducen el crecimiento (Vu *et al.*, 1997). Algunos trabajos donde se ha evaluado el efecto de la temperatura en el desarrollo de la soya, indicaron que el inicio de la floración se retrasó en temperaturas de 32 °C (Borthwick y Parker, 1940), que la formación de la semilla fue más tardada con 30-40 °C (Thomas *et al.*, 2003), y que cuando las plantas fueron expuestas a 35 °C por 10 h durante el día, hubo disminución en el rendimiento de aproximadamente 27 % (Gibson y Mullen, 1996).

Utilizando una técnica de selección basada en la viabilidad del polen a altas temperaturas, Mohammed *et al.*, (2007) diferenciaron genotipos de soya tolerantes, con tolerancia intermedia

y sensibles al calor, además el estudio reveló que la termoestabilidad de la membrana no se correlacionó con los parámetros del polen y que la tolerancia de los tejidos vegetativos tiene poca o nula relación con la tolerancia de los tejidos reproductivos.

Lobell y Asner (2003) evaluaron la relación entre la variación del clima y la producción de maíz y de soya en USA entre 1982 y 1998, informando que por cada 1 °C de aumento en la temperatura, hubo una disminución promedio de 17 % en el rendimiento. Germoplasma de soya de los grupos de madurez III al VII fueron evaluados a tres niveles de potencial osmótico y cuatro regímenes de temperatura para tolerancia a sequía y calor respectivamente, encontrándose que los daños más severos por calor se dieron durante la floración, que la susceptibilidad a dicho factor decreció hacia la madurez y que hubo gran variabilidad entre líneas en la tolerancia tanto para sequía como para temperaturas extremas, pero una no se correlacionó con la otra (Sapra y Anaele, 1991).

El propósito de este trabajo consistió en evaluar la respuesta de 21 genotipos de soya a altas temperaturas durante el estado de plántula, bajo condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se desarrolló bajo condiciones de invernadero en el Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, Texcoco, Edo. de México. La siembra se realizó el 15 de octubre de 2013 en vasos desechables de plástico del número 8. Se utilizaron 300 g de suelo vaso⁻¹, en donde se depositaron dos semillas de soya. Posterior a la emergencia se aclaró a una plántula vaso⁻¹.

Se aplicaron tres riegos a capacidad de campo, uno inmediatamente después de la siembra y dos antes de someter las plántulas a los tratamientos de calor, con una separación de siete días

entre cada uno aproximadamente. Las plántulas se sometieron al tratamiento de calor a los 15 días después de la siembra, cuando tenían las primeras hojas verdaderas (unifoliadas).

Los genotipos (G) evaluados correspondieron a las variedades Huasteca 200, Huasteca 300 y Tamesí, generadas por el INIFAP para el trópico húmedo de México, y las líneas experimentales H98-1052, H02-1656, H02-2309, H02-1337, H98-1325, H98-1240, H98-1021, H02-2248, H02-2091, H02-2331, H02-2295, H02-1991, H02-1123, H02-2224, H06-1192, H06-0698, H10-0242 y H10-0556, del programa de mejoramiento genético de soya del mismo Instituto.

Se usaron cuatro niveles de temperatura (θ) que fueron acumulativos: $\theta_1 = 50 \pm 1$ °C, $\theta_2 = 54 \pm 1$ °C, $\theta_3 = 58 \pm 1$ °C y $\theta_4 = 62 \pm 1$ °C, todos por periodos de dos horas.

En el θ_1 se calificó el grado de cierre de las hojas (GCH), ya que este comportamiento, denominado movimiento nástico, es típico de varias especies vegetales por efecto de un estímulo externo que puede ser iluminación, falta de agua, temperatura, etc. La escala utilizada fue del 1 al 5, donde 1 significó posición totalmente abierta de las hojas y 5 posición totalmente cerrada de las hojas (paralela con el tallo). En el resto de los θ , se registró el grado de marchitez (GM) también en una escala de 1 a 5, donde 1 correspondió a nulo o leve marchitamiento y 5 a marchitamiento avanzado o muerte total del tejido vegetal. El θ_2 se aplicó a las 24 h del θ_1 sobre las mismas plántulas, de tal manera que en el θ_4 se tuvo un efecto acumulativo de los otros tratamientos. Después del último tratamiento se regaron las plántulas a capacidad de campo y a los tres días se observó el grado de recuperación (GR), utilizando la misma escala pero 1 corresponde a GR alto y 5 a GR bajo.

Para la aplicación de los θ , se diseñó una cámara de madera con flujo de calor por medio de un dispositivo generador de aire caliente (Figura 1), con capacidad para regular de manera

manual la temperatura y la velocidad del aire, alcanzando niveles de calor por arriba de los 60 °C. A la cámara se le acondicionó un mecanismo que permitió que el aire caliente no golpeará directamente a las plántulas. El monitoreo de la temperatura se realizó colocando seis termómetros de inmersión, dos en cada uno de los lados de la cámara, aproximadamente a la altura del follaje de las plántulas.

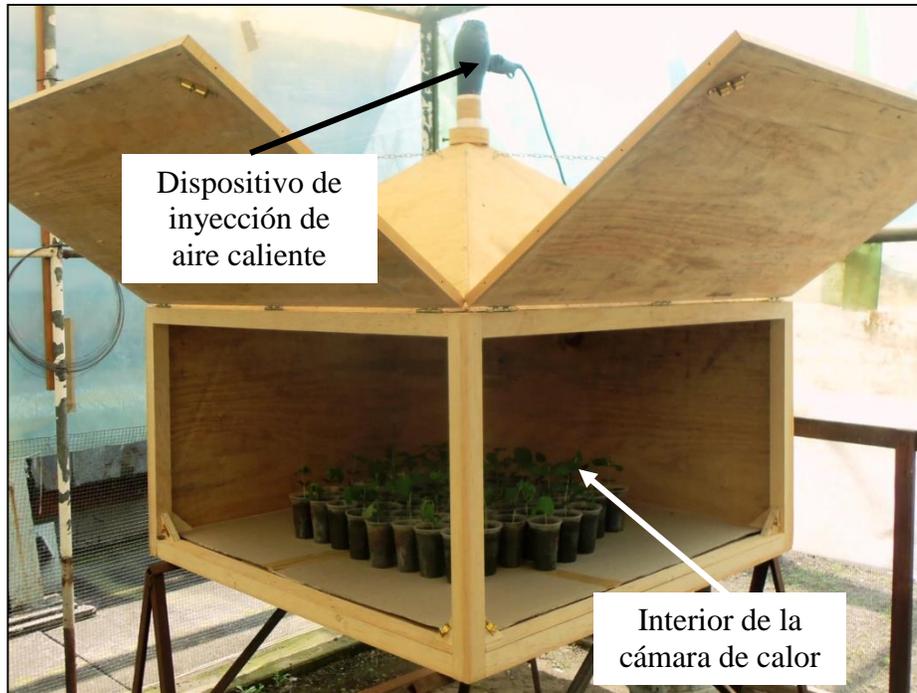


Figura 1. Cámara de flujo de aire caliente diseñada para evaluar la resistencia a altas temperatura de especies vegetales en estado de plántula.

Se utilizó un diseño completamente al azar desbalanceado para el análisis del GCH en θ_1 y el GR posterior al riego después del θ_4 . El GM en el resto de los θ se analizó como un diseño completamente al azar con arreglo factorial 21×3 . El análisis de varianza y la comparación de medias (Duncan, $p \leq 0.05$) se efectuaron mediante el programa SAS. En todos los casos se utilizaron datos transformados por raíz cuadrada. La selección de genotipos con mejor proporción

de efectos genéricos y específicos al estrés por calor se realizó adaptando el modelo uno de resistencia a sequía, publicado por Muñoz (1992).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto del calor sobre el grado de cierre de las hojas considerando el genotipo

Los resultados del análisis de variación para θ_1 mostraron efectos significativos ($p \leq 0.05$) para G, diferenciando claramente un grupo: H02-1656, H02-2309, H98-1325, Huasteca 300, H06-0698 y H10-0556, que fue totalmente insensible a la aplicación de 50 ± 1 °C de temperatura por dos horas (Figura 2), manteniendo sus hojas totalmente abiertas. Mientras tanto, H98-1240 fue el más afectado alcanzando el GCH más alto. Cabe señalar que el θ_1 no generó indicios de marchitamiento (desección) sobre los genotipos, denotando la capacidad de resistencia de la soya a temperaturas por arriba de su umbral térmico.

Los movimientos foliares son frecuentes en leguminosas (Sosa *et al.*, 2000). El cambio de ángulo del foliolo se debe a variaciones de turgencia en las células del pulvinus, una estructura especializada en la base del pecíolo y generalmente están asociadas con la luminosidad del día y la noche. No obstante, Björkman y Demmig-Adams (1994) mencionaron que el movimiento de los foliolos también responde a la temperatura. Taiz y Zeiger (2006) reportaron que las células ventrales y dorsales del pulvinus son las encargadas del movimiento de la hoja y están localizadas en zonas opuestas. Cuando las células ventrales se encuentran turgentes las hojas están abiertas; de forma contraria, al estar las dorsales turgentes se provoca el cierre.

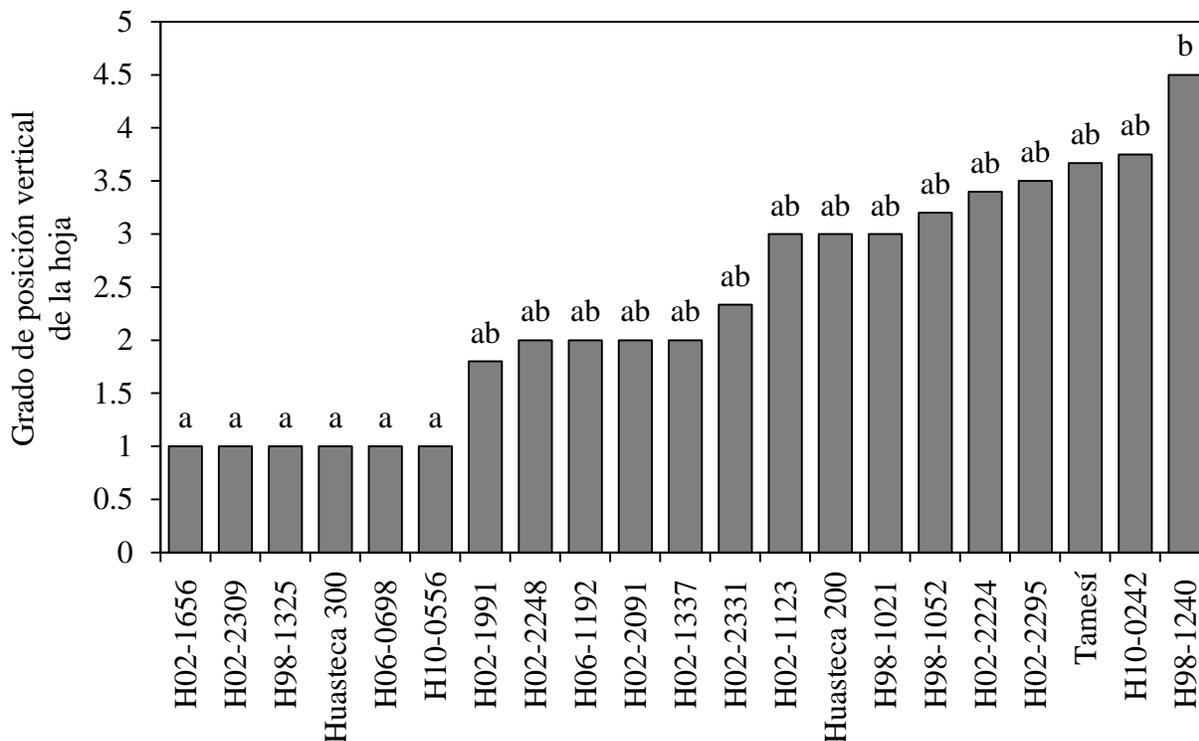


Figura 2. Grado de cierre de las hojas por efecto del calor ($50 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) durante dos horas, en 21 genotipos de soya.

Medias con la misma letra entre genotipos no son diferentes.

Efecto del calor sobre el grado de marchitamiento de las hojas considerando el genotipo y los niveles de temperatura

Se observaron diferencias altamente significativas entre G y entre θ ($p \leq 0.01$). La interacción G* θ no mostró efecto.

El efecto de θ se presenta en la Figura 3. Considerando que θ_4 se aplicó después de θ_3 , θ_2 y θ_1 a las 24, 48 y 72 h respectivamente, acumuló el mayor efecto y mostró el GM más alto con respecto a los otros θ . El aumento del GM fue gradual conforme se iban aplicando los θ .

La relación entre el porcentaje de daños y el grado de temperatura aplicada a dos genotipos de soya, indicó que estos se incrementaron conforme aumentó el nivel de calor, mostrando los

mayores daños entre los 55 y 60 °C (Martineau *et al.*, 1979), resultados muy parecidos a los encontrados en el presente trabajo, ya que la temperatura de 62 ± 1 °C fue la que generó mayor GM en los genotipos evaluados.

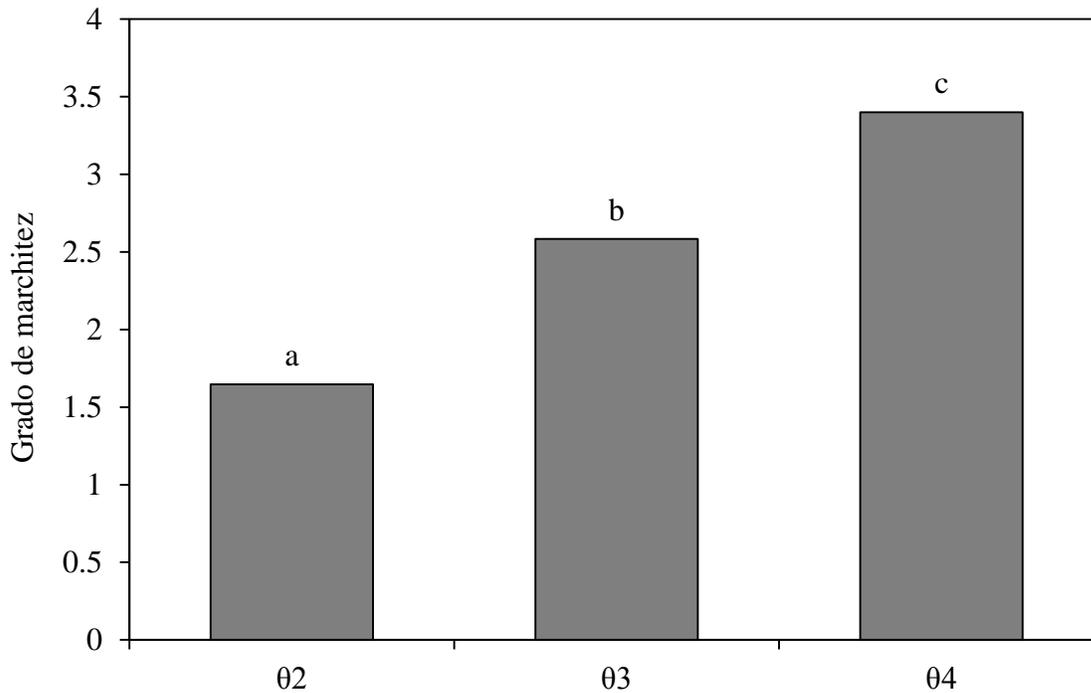


Figura 3. Efecto de tres niveles de temperatura acumulativos sobre el grado de marchitamiento de 21 genotipos de soya.

Medias con la misma letra entre niveles de temperatura no son diferentes.

θ2 = 54 ± 1 °C; θ3 = 58 ± 1 °C; θ4 = 62 ± 1 °C.

Con respecto a los genotipos, el GM fue más bajo en H02-1337 mostrando una mayor resistencia del tejido vegetal a los θ aplicados; H98-1240 fue el menos tolerante y acumuló mayor GM por efecto del estrés por calor (Figura 4), éste también fue el más sensible en el GCH al exponerse a θ_1 , sin embargo la correlación entre GCH y GM no fue significativa. Lo que indica que son mecanismos relativamente diferentes.

Sapra y Anaele (1991) también encontraron variabilidad genética en líneas de soya pertenecientes a diferentes grupos de madurez, las cuales se sometieron a regímenes de

temperatura de 10, 25, 50 y 110 °C en diferentes etapas del desarrollo; se identificaron las líneas PI 408.115, PI 423.827 B, PI 423.759 y Pershing como las más tolerantes. Basado en la termoestabilidad de la membrana, Bouslama y Schapaugh (1984) reportaron 44 % de daños en el cultivar Essex y de 75 % en K1059, Cutler 71, Pixie, Cumberland y Bedford cuando se sometieron a 50 °C durante el inicio de la floración.

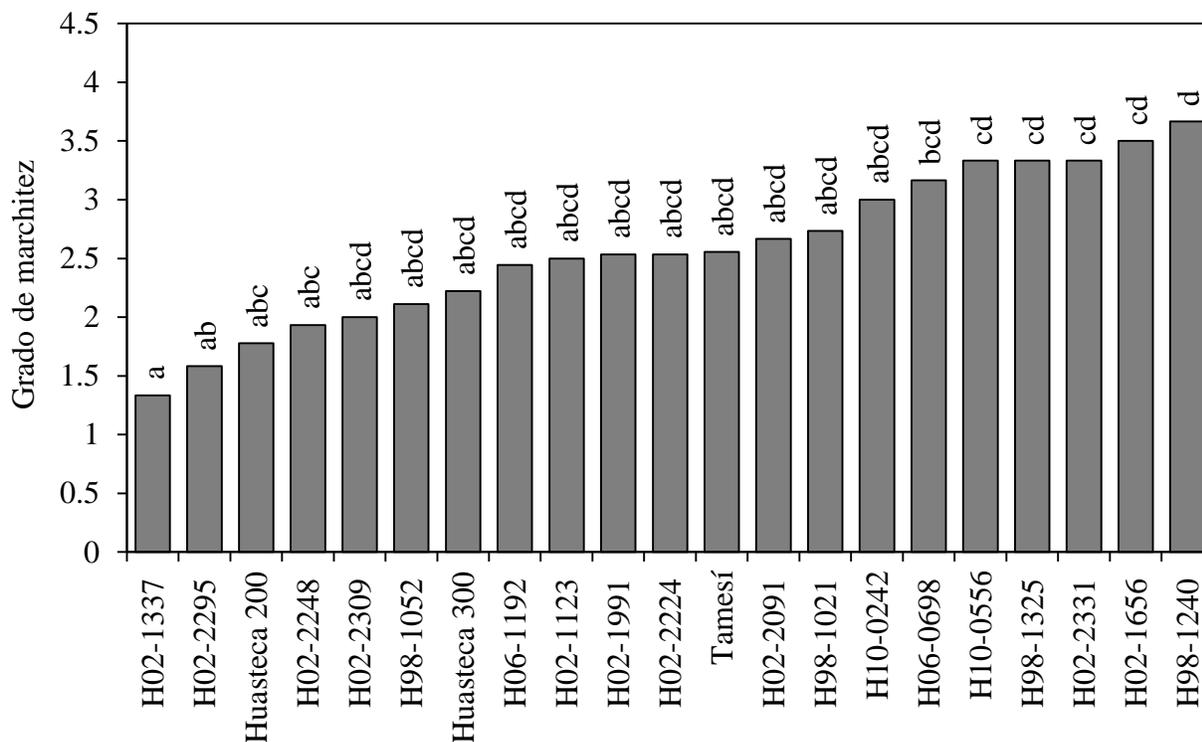


Figura 4. Grado de marchitamiento en 21 genotipos de soya sometidos a tres niveles de temperatura en etapa de plántula.

Medias con la misma letra entre niveles de temperatura no son diferentes.

Selección de genotipos con mayor resistencia al calor considerando el grado de marchitez

Los genotipos con menor GM y que constituyen el 20 % con mayor proporción de efectos genéricos de acuerdo con el modelo adaptado de Muñoz (1992) se observan en la Figura 5.

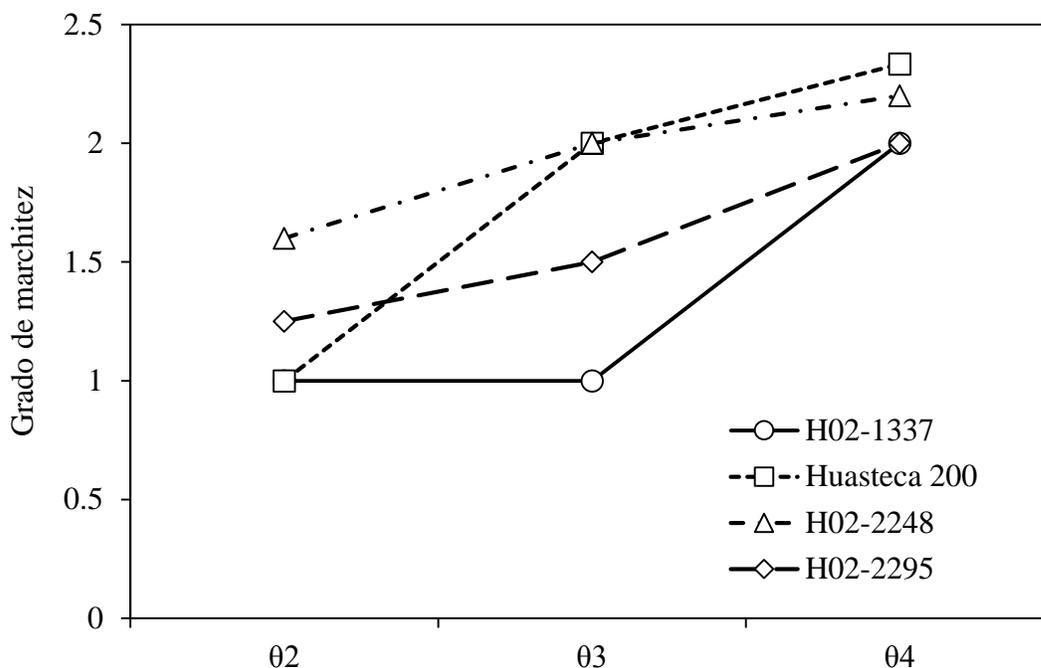


Figura 5. Interacción niveles de temperatura por genotipos sobre el grado de marchitez en genotipos de soya seleccionados por mayor proporción de efectos genéricos.

$\theta_2 = 54 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_3 = 58 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_4 = 62 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Una vez graficados los resultados de la interacción $G*\theta$ se observó que H02-1337 no mostró marchitamiento en θ_2 y θ_3 , pero éste se incrementó de manera drástica al pasar de θ_3 a θ_4 . Por otro lado, H02-2295 y H02-2248 aumentaron más o menos en la misma proporción el GM de θ_2 a θ_3 , considerando que poseen mayores efectos específicos a altas temperaturas que los demás, pero de θ_3 a θ_4 , la pendiente es menos ascendente en H02-2248 (Figura 5).

Efecto del riego de recuperación

La respuesta de los genotipos al riego de recuperación también mostró variabilidad, ya que hubo genotipos cuyas hojas se marchitaron en mayor grado, en comparación con otros que sufrieron pocos cambios y su GR fue bajo. Sin embargo, la variabilidad más bien puede atribuirse

a efectos aleatorios y no al efecto de G, ya que según la prueba de medias, el agrupamiento de genotipos fue muy estrecho (Figura 6).

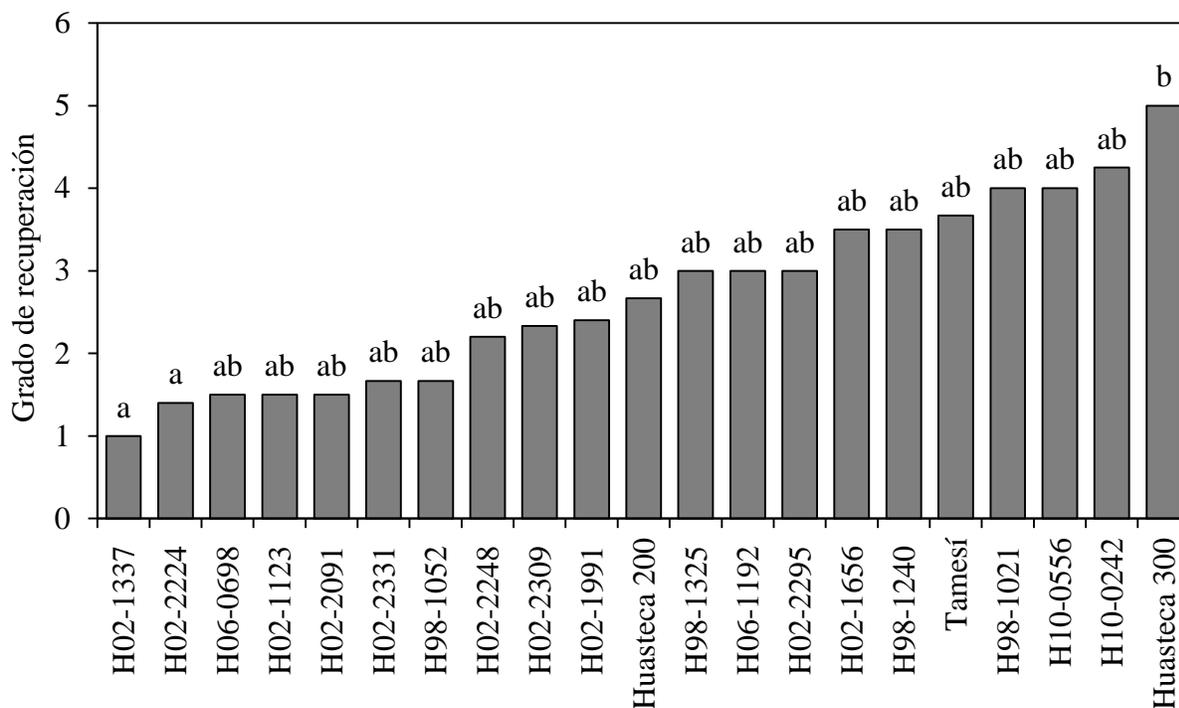


Figura 6. Efecto del riego sobre el grado de recuperación en genotipos de soya sometidos a varios tratamientos de altas temperaturas.

Medias con la misma letra entre genotipos no son diferentes.

Pudieran considerarse a H02-1337 y H02-2224 como los que recuperaron en mayor proporción la turgencia y el verdor de las hojas a los tres días después del riego, pero estadísticamente formaron parte del grupo superior con otros 18 genotipos. Huasteca 300 obtuvo el GR más bajo, indicando mayor susceptibilidad al calor, aunque sólo fue diferente de H02-1337 y H02-224 (Figura 6).

Los coeficientes de correlación entre GCH, GM y GR no resultaron significativos. Por lo que los efectos de los tratamientos sobre las variables evaluadas fueron independientes.

CONCLUSIONES

La aplicación de 50 ± 1 °C no causó marchitamiento, pero se observaron diferencias entre genotipos en el grado de cierre de las hojas; seis genotipos fueron totalmente insensibles y H98-1240 cerró totalmente sus hojas por efecto del calor. Entre niveles de temperatura, la aplicación de 62 ± 1 °C causó el mayor marchitamiento, ya que acumuló los efectos de 50 ± 1 , 54 ± 1 y 58 ± 1 °C; mientras que entre genotipos, 15 obtuvieron un bajo grado de marchitez, destacando H02-1337, H98-1240 resultó el más afectado por el estrés. De los genotipos seleccionados por efectos genéricos, H02-2248 aumentó en menor proporción el grado de marchitez entre los dos niveles de mayor calor. La respuesta de los genotipos al riego de recuperación mostró que hubo genotipos cuyas hojas se marchitaron en mayor grado y genotipos que se marchitaron menos, sin embargo la variabilidad se debió más bien a efectos aleatorios. Los resultados anteriores sugieren que la selección de genotipos de soya resistentes a altas temperaturas por medio de la aplicación de aire caliente en estado de plántula, constituye una técnica sencilla y confiable con la cual se pueden obtener resultados en poco tiempo. Debido a que gran proporción de la variabilidad en los resultados fue aleatoria, se recomienda aumentar la unidad experimental y contemplar el uso de variables cuantitativas para reducir el error experimental.

LITERATURA CITADA

- Allen, L. H., and K. J. Boote. 2000. Crop ecosystem responses to climate change: Soybean. *In*: K. R. Reddy and H. F. Hodges (eds.). *Climate change and global crop productivity*. CAB International, Wallingford, UK. pp. 133–160.
- Alexandrov, V. 1994. Functional aspects of cell response to heat shock. *Int. Rev. Cytol.* 148, 171–227.

- Björkman, O., and B. Demmig-Adams. 1994. Regulation of photosynthetic light energy capture, conversion, and dissipation in leaves of higher plants. *In*: E. D. Schulze and M.M. Caldwell (eds.). *Ecophysiology of photosynthesis*. Springer-Verlag, Berlin. pp. 17-47.
- Borthwick, H.A., and M. W. Parker. 1940. Floral initiation in Biloxi soybeans as influenced by age and position of leaf receiving photoperiodic treatment. *Bot. Gaz.* 101: 806–812.
- Bousslama, M., and Schapaugh, W. T. 1984. Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Sci.* 24: 933-937.
- Gibson, L. R., and R. E. Mullen. 1996. Soybean seed quality reductions by high day and night temperature. *Crop Sci.* 36: 1615–1619.
- Lobell, D. B., and G. P. Asner. 2003. Climate and management contributions to recent trends in U.S. agricultural yields. *Science* 299: 1032.
- Maldonado M., N., G. Ascencio L., G. Espinosa V., y M. de los A. Peña del R. 2013. Estrategias tecnológicas para contrarrestar la sequía en la producción de soya en el sur de Tamaulipas. INIFAP. México. 65 p.
- Martineau, J. R., Specht, J. E., Williams, J. H., and Sullivan, C. Y. 1979. Temperature tolerance in soybeans. I. Evaluation of a technique for assessing cellular membrane thermostability. *Crop Sci.* 19: 75-78.
- Mohammed, A. S., V. Gopal K., S. Koti, and K. Raja R. 2007. Pollen-based screening of soybean genotypes for high temperatures. *Crop Sci.* 47: 219-231.

- Muñoz O., A. 1992. Modelo uno o de interacción genotipo por niveles de sequía y resistencia a factores adversos. *In: Memoria del Simposio Interacción Genotipo-Ambiente en Genotecnia Vegetal*. 22-27 de marzo. Sociedad Mexicana de Fitogenética, Guadalajara Jalisco, México. pp. 261-266.
- Peet, M. M. and Willits, D. H. 1998. The effect of night temperature on greenhouse grown tomato yields in warm climate. *Agric. Forest Meteorol.* 92: 191-202.
- Raper, C. D., and P. J. Kramer. 1987. Soybeans: Improvement, production, and uses. *In: J. R. Wilcox (ed.). Stress physiology. Monograph 16. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.* pp. 589-641.
- Sapra, V. T., and Anaele, A. O. 1991. Screening soybean genotypes for drought and heat tolerance. *J. Agron. Crop Sci.* 167: 96-102.
- Salem, M. A., Kakani, V. G., Koti, S., and Reddy, K. R. 2007. Pollen-based screening of soybean genotypes for high temperatures. *Crop Sci.* 47: 219-231.
- Sosa E., Ortega, M., Escalante, A., Engleman, M., y González, V. 2000. Inclinación de láminas de frijol durante el día. *Terra Latinoam.* 18: 147-152.
- Sullivan, C. Y. 1972. Mechanisms of heat and drought resistance in grain sorghum and methods of measurement. *In: Rao, N. G. P., and L. R. House (eds.). Sorghum in Seventies.* Oxford & I.B.H. Publishing Co. New Delhi, India.
- Taiz, L., y E. Zeiger. 2006. *Fisiología Vegetal*. Universitat Jaume I. Castellón de la Plana, España. 1336 p.

Thomas, J. M. G., K. J. Boote, L. H. Allen, M. Gallo-Meagher, and J. M. Davis. 2003. Elevated temperature and carbon dioxide effects on soybean seed germination and transcript abundance. *Crop Sci.* 43: 1548–1557.

Vu, J. C. V., L. H. Allen, K. J. Boote, and G. Bowes. 1997. Effects of elevated CO₂ and temperature on photosynthesis and rubisco in rice and soybean. *Plant Cell Environ.* 20: 68–76.

Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., and Foolad, M. R. 2007. Heat tolerance in plants: an overview. *Environ. Exp. Bot.* 61: 199-223.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

Un grupo de genotipos fue insensible a la sequía con respecto a la altura de planta, otro la redujo y un tercero la incrementó. Genotipos tardíos acumularon clorofila en sequía y los precoces la redujeron. La temperatura del dosel fue mayor en sequía a los 60 y 90 días después de la siembra. La disminución del rendimiento por sequía fue más intensa en genotipos tardíos. Mayor resistencia a sequía fue observada en: H02-2295, H98-1240, y H10-0242.

La sobresaturación de humedad aumentó la altura de planta y redujo la temperatura del dosel. H10-0556 tuvo mayor proporción de efectos genéricos en el crecimiento. Hubo genotipos insensibles al exceso de humedad en la altura de planta. El exceso de humedad no afectó a las plantas en su etapa reproductiva, H10-0242 fue el más rendidor, pero H98-1325 mantuvo el rendimiento con o sin exceso humedad.

La aplicación de 50 ± 1 °C no causó marchitamiento en las plántulas, pero se observaron diferencias en el grado de cierre de las hojas; 62 ± 1 °C provocó el mayor marchitamiento. H02-2248 tuvo mayor proporción de efectos genéricos y específicos a las altas temperaturas. La variabilidad observada se debió en gran proporción a efectos aleatorios.

La variabilidad de respuestas de los genotipos a los diferentes estreses, permitió rechazar la hipótesis nula y aceptar la alternativa. Las metodologías utilizadas fueron adecuadas para detectar genotipos sobresalientes en crecimiento y rendimiento aún en condiciones de estrés. Estos pueden utilizarse como progenitores en los programas actuales de mejoramiento de soya en México.

Se recomienda repetir los experimentos en regiones diferentes para validar los resultados obtenidos, previo ajuste y precisión de los procedimientos utilizados. Estos estudios pueden complementarse con selección asistida por marcadores moleculares. Para disminuir el error experimental en la evaluación para resistencia a calor de los genotipos, es conveniente aumentar el tamaño de la unidad experimental e incluir la medición de variables cuantitativas.

APÉNDICE

Apéndice 1. Genealogía y origen de la semilla de los genotipos de soya que se utilizaron para la evaluación de resistencia a factores abióticos adversos en México.

Núm.	Genotipo	Genealogía	Origen
1	H98-1052	H88-1880 x H88-3868	EUTH 2012
2	H02-1656	Santa Rosa x F81-5517	EUTH 2012
3	H02-2309	H88-0930 x H88-0934	EUTH 2012
4	H02-1337	H88-0956 x GO83-33033	EUTH 2012
5	Tamesí	Santa Rosa x H80-2535	EUTH 2012
6	H98-1325	H88-3964 x LAMAR	EUTH 2012
7	Huasteca 200	F81-5344 x Santa Rosa	EUTH 2012
8	H98-1240	H88-3964 x H88-1880	EUTH 2012
9	H98-1021	(Padre x Sta. Rosa) x Sta. Rosa	EUTH 2012
10	Huasteca 400	Dois Marcos 301	EUTH 2012
11	H02-2248	UFV-1 x H88-0934	EUR-1 2012
12	H02-2091	H88-0930 x H88-1880	EUR-1 2012
13	H02-2331	Santa Rosa x H88-0930	EUR-1 2012
14	H02-2295	Huasteca-100 x H88-0930	EUR-1 2012
15	H02-1991	UFV-1 x H88-1880	EUR-1 2012
16	H02-1123	H88-1880 x GO83-33033	EUR-1 2012
17	H02-2224	Santa Rosa x Huasteca-100	EUR-1 2012
18	H06-0589	H98-1365 x H98-1228	EUR-1 2012

19	H06-0560	H98-1365 x H98-1228	EUR-2 2012
20	H06-1192	H98-1668 x H98-1240	EUR-2 2012
21	H06-0698	H98-1365 x H98-1228	EUR-2 2012
22	H06-1637	H98-1114 x DM-301	EUR-2 2012
23	Huasteca 300	H82-1930 x H80-2535	EUTH 2012
24	H10-0242	H02-2167 x H88-1880	PPR-1 2012
25	H10-0556	H02-1656 x H88-0930	PPR-1 2012

EUTH = Ensayo uniforme trópico húmedo; EUR = Ensayo uniforme regional; PPR = Prueba preliminar de rendimiento.

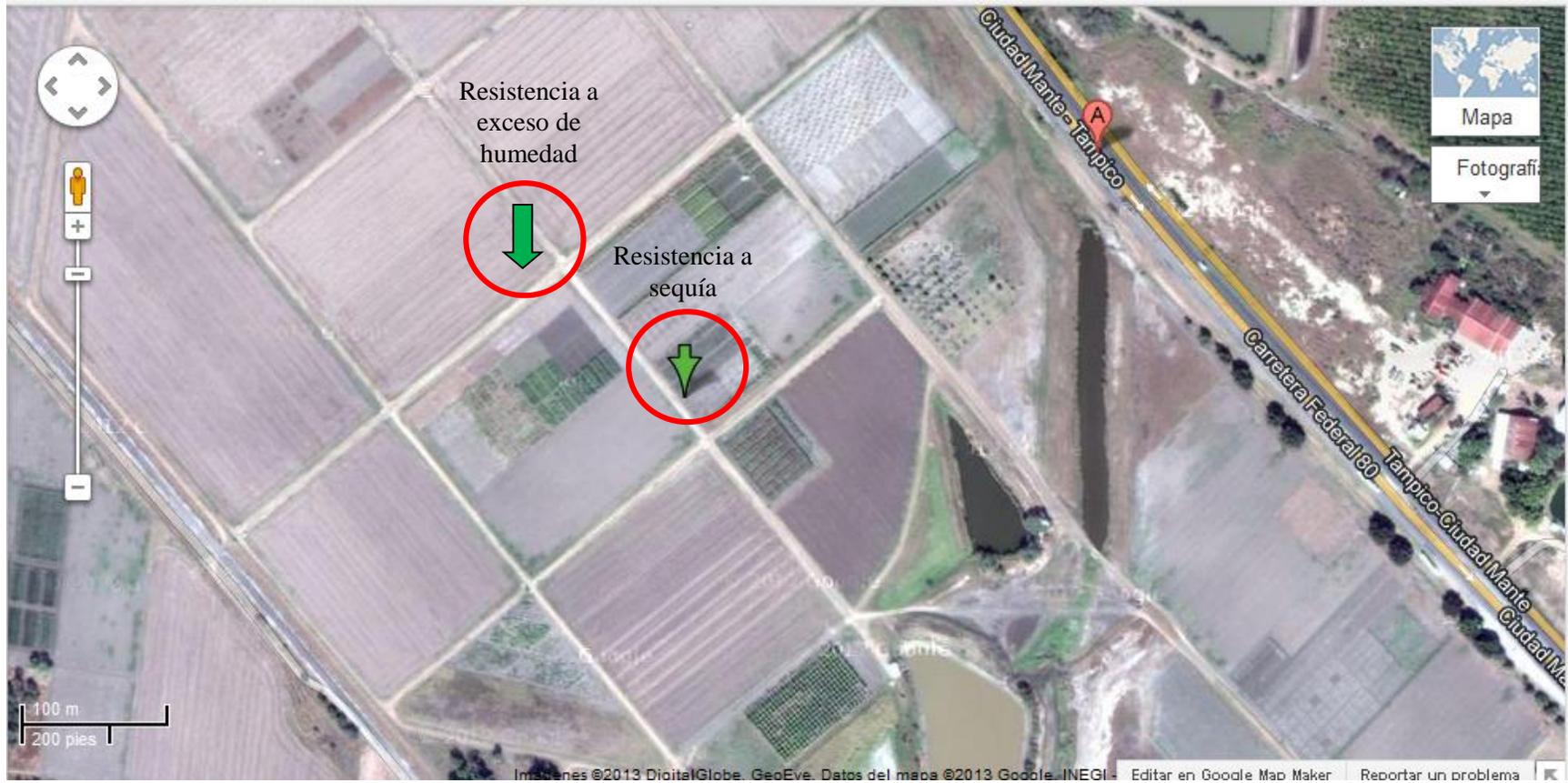
Apéndice 2. Diseño experimental utilizado para el experimento de sequía y de exceso de humedad.

Rep. II	Bordo	100	99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	Bordo	Tratamiento S ₁
		21	22	25	23	24	20	18	17	16	19	3	1	5	2	4	8	9	6	7	10	11	15	12	14	13		
<i>Pasillo de 1 m</i>																												
Rep. I	Bordo	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	Bordo	Tratamiento S ₁
		9	14	24	19	4	16	6	21	11	1	22	12	7	2	17	23	18	13	8	3	20	15	25	10	5		
<i>Pasillo de 2 m</i>																												
Faja de Huasteca 200 (2 m)																												
<i>Pasillo de 2 m</i>																												
Rep. II	Bordo	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	Bordo	Tratamiento S ₀
		24	9	14	4	19	13	23	8	3	18	11	16	1	21	6	20	25	5	10	15	17	22	7	2	12		
<i>Pasillo de 1 m</i>																												
Rep. I	Bordo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Bordo	Tratamiento S ₀
		6	7	9	8	10	2	5	1	3	4	24	21	25	22	23	20	16	18	17	19	15	14	13	11	12		
Línea de riego																												

Apéndice 2. Ubicación de los sitio para la evaluación de resistencia a sequía y a exceso de humedad en campo.

Coordenadas:

22° 34'11.25" de Lat. Norte y 98° 10'13.04" de Long. Oeste.



Apéndice 3. Ubicación del sitio para la evaluación de resistencia a calor.

Coordenadas:

19° 27' 39.52" de Lat. Norte y 98° 54' 14.79" de Long. Oeste.



Apéndice 4. Compendio fotográfico.



Siembra del experimento de sequía el 26 de diciembre de 2012.



Aspecto del experimento de sequía a los 30 días después de la siembra.



Se utilizó el TDR 300 (Spectrum Technologies Inc.) para medir el contenido volumétrico de agua por unidad experimental.



El Leaf Porometer SC-1 (Decagon Devices Inc.) nos ayudó a determinar la conductancia estomática.



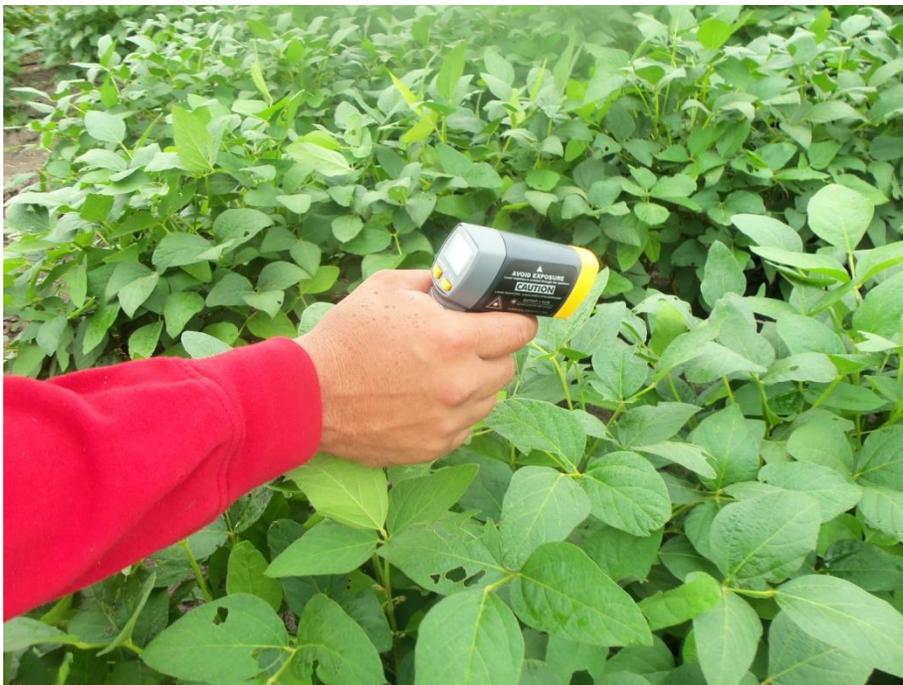
Los bloques de riego aproximadamente a los 90 días después de la siembra.



Los bloques de sequía aproximadamente a los 90 días después de la siembra.



El potencial hídrico en el experimento de exceso de humedad se midió con una bomba de presión hidráulica tipo Scholander.



La temperatura del dosel se registró con un termómetro de rayos infrarrojos (Spectrum Technologies Inc.)



Medición del índice de clorofila con el Minolta SPAD-502 Plus
(Spectrum Technologies Inc.).



Aspecto del experimento de exceso de humedad a los 45 días después
de la siembra, justo cuando la precipitación había disminuido.



Siembra del experimento de calor bajo condiciones de invernadero.



Plántulas de soja en el interior de la cámara de calor, antes de ser sometidas a los tratamientos.



Con el Dr. Abel Muñoz Orozco en la parcela para evaluar resistencia a sequía en el Campo Experimental Las Huastecas, Altamira, Tamps.