

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

Resistencia a sequía y tolerancia a calor en cebada y trigo

Leonel Hernández-Santiago¹, Cándido López-Castañeda^{1,*}, Víctor Heber Aguilar-Rincón¹, Edwin Javier Barrios-Gómez²

¹Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Colegio de Postgraduados, carretera México-Texcoco km. 36.5, Montecillo, Municipio de Texcoco, Estado de México. C.P. 56230; ² Campo Experimental Zacatepec, INIFAP, Zacatepec, Morelos. *Autor para correspondencia: clc@colpos.mx

Abstract

This study was conducted to assess the response of some barley and bread wheat genotypes to drought and high temperature stress at anthesis and during the grain-filling period in glasshouse and outdoors conditions. This showed high temperature in glasshouse reduced grain yield (GY), spikes/plant and plant height. Drought decreased GY and its components, shortened plant biological cycle and increased the length of the longest root, total root dry weight (TRDW), root/shoot ratio and root dry weight at different soil strata. Barley exhibited greater sensitivity to drought and heat stress than bread wheat; it had a greater reduction in GY and harvest index (HI) than bread wheat. However, high temperature in glasshouse under watering and drought conditions increased TRDW in barley, whereas the reverse was observed for bread wheat under both watering and drought conditions.

Keywords: Biomass, grain yield, harvest index, high temperature, water stress

Introducción

La escasez de agua en el suelo es el principal factor limitante del crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos en áreas de secano en México y el mundo; las deficiencias hídricas del suelo pueden reducir la acumulación de materia seca en la planta, al disminuir la velocidad de crecimiento y el desarrollo del área foliar. El efecto negativo del déficit hídrico en la planta se agudiza en presencia de otros factores abióticos desfavorables como las temperaturas altas o calor, temperaturas bajas o heladas, salinidad y baja fertilidad del suelo, y factores bióticos desfavorables como plagas y enfermedades. Una forma de mejorar el rendimiento de grano bajo condiciones de estrés puede lograrse a través de la selección de genotipos mejor adaptados y con tolerancia genética a factores bióticos y abióticos desfavorables, que ocurren con frecuencia durante la estación de crecimiento en los sistemas agrícolas.

El mejoramiento de la adaptación y tolerancia a sequía puede conseguirse al identificar uno o más caracteres superiores en la planta, p. ej., “con el descubrimiento y generación de variación genética para caracteres agronómicos, desarrollo de genotipos con atributos nuevos o mejorados debido a combinaciones superiores de alelos en loci múltiples y la selección precisa de genotipos raros que

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

posean características nuevas mejoradas” (Sorrells, Diab y This, 2006, p. 238). Las fuentes tradicionales de variación genética incluyen “material genético nativo, materiales silvestres y plasma germinal mejorado; las mutaciones inducidas y más recientemente la transformación de plantas han hecho contribuciones menores en el desarrollo de nuevas variedades de cebada y trigo” (Sorrells, Diab y This, 2006, p. 238). No obstante, “las comparaciones entre especies han hecho posible identificar características importantes de la planta, para la selección bajo condiciones de estrés hídrico en áreas de secano” (López-Castañeda, Richards, Farquhar y Williamson, 1996, p. 1257).

Los cultivos responden similarmente a la sequía y el calor; el ciclo biológico es acelerado, reduciendo la capacidad fotosintética vía restricción del área foliar y su duración; Reynolds, Hays y Chapman (2010) señalan que “el metabolismo es inhibido a temperaturas y potenciales hídricos fuera del rango óptimo para el crecimiento, y los procesos reproductivos son afectados cuando el estrés ocurre en etapas críticas, reduciendo el número de granos producidos” (p. 71).

La selección requiere hacer pruebas en diferentes ambientes con una caracterización detallada de los sitios que permita la disección de la interacción genotipo x ambiente y la retroalimentación en los programas de mejoramiento e investigación. Un fenotipado preciso del germoplasma puede asistir la disección del rendimiento en sus componentes fisiológicos y tener una aplicación en la selección, y el descubrimiento de genes favorables; ejemplos de caracteres de adaptación al estrés que se han utilizado en diferentes especies incluyen “raíces profundas que permiten que las plantas permanezcan hidratadas bajo sequía y mantengan doseles vegetales más frescos bajo condiciones de estrés por calor, eficiencia transpiratoria, senescencia retrasada en sorgo y sincronía en la floración del maíz” (Reynolds, Hays y Chapman, 2010, p. 71).

Las plantas pueden responder en forma diferencial al estrés, al considerar que el efecto del déficit hídrico se manifiesta principalmente en las raíces, mientras el efecto de la temperatura alta puede manifestarse más directamente en los órganos aéreos de la planta.

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo estudiar la respuesta en el rendimiento de grano y sus componentes, y el crecimiento del sistema radical en un grupo de genotipos de cebada y trigo, bajo condiciones de déficit hídrico del suelo y temperatura alta durante la floración y el periodo de llenado del grano, en condiciones de invernadero y fuera del invernadero.

Materiales y Métodos

Localidad

Se realizó un experimento en condiciones de invernadero en el área de resistencia a sequía del Colegio de Posgraduados en Montecillo, Texcoco, Estado de México (19° 21' N, 98° 55' O y 2240 msnm). El sitio se caracteriza por presentar un clima templado subhúmedo (C (w0/w'1)(w) b(e) g), con lluvias en verano, precipitación media anual de 635 mm de mayo a septiembre y

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

temperatura media anual de 15 °C (García, 1988). El suelo utilizado fue franco-arenoso con alto contenido de arena (Tabla 1).

Tabla 1. Características físicas del suelo utilizado en el experimento

T	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	DA (T m ⁻³)	CC (%)	PMP (%)
Franco-arenoso	62.9	27.3	9.8	1.12	41.6	28.2

T=Textura; DA=Densidad aparente; CC=Capacidad de campo; PMP=Porcentaje de marchitamiento permanente; T, DA, CC y PMP se determinaron con el método del hidrómetro de Bouyoucos, de la probeta, olla de presión equivalente a 0.1 kPa y membrana de presión equivalente a 15 kPa, respectivamente. Laboratorio Central Universitario, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.

Material genético

Se utilizaron siete variedades comerciales de cebada con diferente origen genético; O'Connor de dos hileras proveniente del sureste de Australia y las otras seis variedades fueron liberadas por el INIFAP, México; también se incluyeron ocho líneas avanzadas obtenidas en el Programa de Mejoramiento Genético en Agrosistemas de Temporal (PROMEGAT), Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de México, México (Tabla 2). Adicionalmente, se incluyeron 13 variedades de trigos antiguos y modernos, liberados en México y otros países en diferentes eras de mejoramiento genético; cuatro líneas de trigo del PROMEGAT, una línea experimental de ICARDA, Siria (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas), dos líneas avanzadas del Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad de Guanajuato, Gto., México y un criollo 'venturero' de Oaxaca, México (Tabla 2).

Diseño experimental y tratamientos de humedad edáfica y temperatura del ambiente

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar en arreglo factorial con dos tratamientos de temperatura del aire (fuera del invernadero e invernadero), dos tratamientos de humedad edáfica (riego y sequía) y 33 genotipos de cebada y trigo, con dos repeticiones. La unidad experimental consistió de una planta individual en un tubo de PVC de 1 m de alto por 4" de diámetro, con una bolsa cilíndrica de plástico de las mismas dimensiones, llena con suelo esterilizado. La siembra se realizó el 13 de junio de 2016 en suelo a CC, al utilizar semillas del mismo peso (35 mg) para los genotipos de trigo y 38 mg para las variedades de cebada; se aplicó la dosis de fertilización 80-40-00 a los 23 días después de la siembra (dds).

Los tratamientos de temperatura del ambiente consistieron en: (i) exponer todas las plantas a la temperatura ambiente fuera del invernadero con una cubierta de polietileno para evitar la caída de lluvia sobre los tubos, desde la siembra hasta el inicio de la floración y (ii) conducir la mitad de las plantas en condiciones de invernadero desde el inicio de la floración (55 dds) hasta la madurez fisiológica, y por otro lado, mantener la otra mitad de las plantas fuera del invernadero hasta la madurez fisiológica. El régimen de temperatura promedio día/noche fuera del invernadero de la siembra al inicio de la antesis (55ds) para todas las plantas fue 36.7/11.3 °C y desde el inicio de la

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

antesis (55 dds) hasta la madurez fisiológica fue 36.9/9.3 °C, y dentro del invernadero para el periodo entre el inicio de la antesis y la madurez fisiológica fue 42.2/9.5 °C.

El tratamiento de riego consistió en mantener el contenido de humedad del suelo cercano a CC desde la siembra hasta la madurez fisiológica de las plantas y el tratamiento de sequía consistió en aplicar agua desde la siembra hasta los 36 dds, fecha en la que se suspendió, la aplicación de agua hasta la madurez fisiológica. Se hicieron aplicaciones de afidox 40 % C.E. (Dimetoato 400 g de i.a./L) a una dosis de 1 L ha⁻¹ a los 37 y 81 dds para el control del pulgón (*Metopolophium dirhodum* Walker).

Tabla 2. Germoplasma utilizado para el experimento

No. de variedad	Genealogía	Origen	DA	AP (cm)	RG (g m ⁻²)
Variedades comerciales de cebada					
1	O' Connor (2 hileras) [£]	Depto. de Agricultura, Nueva Gales del Sur, Australia	73	66	210
2	Centinela (6 hileras)	INIFAP, México	-	-	-
Líneas F₆ de cebada, Colegio de Postgraduados, México					
3	Centinela x Cerro Prieto CPRSC-1-8M-3MR-3M-0MR (6 hileras) [£]	PROMEGAT, COLPOS, México	73	85	460
4	Centinela x Cerro Prieto CPRSC-1-9M-1MR-5M-0MR (6 hileras) [£]	PROMEGAT, COLPOS, México	75	79	500
5	Centinela x Cerro Prieto CPRSC-1-15M-4MR-1M-0MR (6 hileras) [£]	PROMEGAT, COLPOS, México	75	76	470
6	Esperanza x Cerro Prieto CPRSC-5-13M-1MR-2M-0MR (6 hileras) [£]	PROMEGAT, COLPOS, México	73	91	310
7	Esperanza x O' Connor CPRSC-6-2M-1MR-2M-0MR (2 hileras) [£]	PROMEGAT, COLPOS, México	73	104	700
8	Esperanza x O' Connor CPRSC-6-4M-2MR-3M-0MR (2 hileras) [£]	PROMEGAT, COLPOS, México	-	-	-
9	Esperanza x O' Connor CPRSC-6-8T-1MS-1T-0MS (2 hileras) [£]	PROMEGAT, COLPOS, México	73	107	310
10	Esperanza x O' Connor CPRSC-6-8T-2MS-1T-0MS (2 hileras) [£]	PROMEGAT, COLPOS, México	73	97	440
Trigos antiguos y modernos mexicanos					
11	Gabo [£]	Australia	68	124	324
12	Marroquí [£]	Marruecos	61	125	323
13	Lerma 52 [£]	México	67	122	166
14	Yaqui 50 [£]	México	52	113	387
15	Nainari 60 [£]	México	70	106	392
16	Bajío 67 [£]	México	52	76	289
17	Jupateco F-73 [£]	México	65	90	213
18	Salamanca S-75 [£]	México	57	90	379
19	Yecora Rojo [£]	México	56	74	177
20	Romoga F-96 [£]	México	66	92	368
21	Tlaxcala F-2000 [£]	México	60	96	344
22	Summit [£]	EE.UU.	68	75	349
23	Blanca Grande [£]	EE.UU.	56	88	263

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

24	Temporalera M-87/Col.1718 CPRST-13 13T(F3)	PROMEGAT, COLPOS, México	-	-	-
25	V-84021/bol'S'/Pvn 'S' ICW92-00-73-0AP-0L-AP	ICARDA, Siria	-	-	-
26	(Dialog/Temp)/(Kurg/Meteor) 31/2-9511-ICA-31-0MR (Resistencia multigénica)	ICA, Universidad de Guanajuato y Rusia	-	-	-
27	Druzhina/Satélite//Kurg/Meteor 47/2-9511-ICA-21-0MR (Fuente de resistencia a sequía)	ICA, Universidad de Guanajuato y Rusia	-	-	-
28	“Criollo Venturero” ^π	Oaxaca, México	105	89	88
Varietades comerciales de cebada, INIFAP, México					
29	Adabella ^μ	INIFAP, México	72	75	415
30	Alina ^μ	INIFAP, México	68	100	710
31	Armida ^μ	INIFAP, México	71	97	590
32	Esmeralda INIFAP ^μ	INIFAP, México	73	86	310
33	Esperanza INIFAP ^μ	INIFAP, México	73	61	250

DA=Días a antesis; AP=Altura de planta; RG=Rendimiento de grano; Datos de DA, AP y RG obtenidos de [‡]López-Castañeda (2011); [‡]ciclo Montecillo-Verano-2010 (López-Castañeda, 2012); ^πMiranda-Domínguez et al. (2016); ^μSolano et al. (2009), ^μZamora et al. (2008) y ^μZamora et al. (2010), respectivamente.

Variables medidas

Grados día de crecimiento (GDC, °Cd); el número de grados día (°Cd) se calculó como la sumatoria de la temperatura media acumulada diariamente de la siembra a la antesis y madurez fisiológica de la forma siguiente:

$$GDC = \sum_i^n \left(\frac{T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{n}}}{2} \right)_i - T_b \quad (1)$$

donde, $T_{m\acute{a}x}$ es la temperatura (°C) máxima diaria y $T_{m\acute{n}}$ es la temperatura (°C) mínima diaria y T_b es la temperatura base con un valor de 0 °C, para cebada y trigo (López-Castañeda, Richards, Farquhar y Williamson, 1996, p. 1263).

Antesis (A, °Cd); se determinó cuando la espiga del tallo principal de la planta mostró anteras en dehiscencia fuera de las glumas en las espiguillas de la espiga en las variedades de trigo y anteras en dehiscencia dentro de las glumas de las espiguillas en cebada, que en la mayoría de los casos ocurrió con la espiga o parte de la espiga envuelta en la vaina de la hoja bandera.

Madurez fisiológica (MF, °Cd); se determinó cuando el 80 % de los órganos aéreos presentes en la planta adquirieron un color paja característico del genotipo.

Altura de planta (AP, cm); se midió desde la base del tallo principal hasta la última espiguilla en la espiga de cada planta.

Peso seco de la parte aérea o biomasa aérea (PSPA, g PI⁻¹); cuando las plantas alcanzaron la madurez fisiológica, se procedió a cortarlas al ras del suelo y colocarlas en bolsas de papel, para llevarlas a secado en una estufa con circulación de aire forzado (RIOSSA, modelo HS82) a una temperatura de 70 °C durante 48 h.

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

Número de espigas por planta ($E \text{ PI}^{-1}$); se contó el número de espigas presentes en la planta después de la madurez fisiológica.

Número de granos por planta ($G \text{ PI}^{-1}$); se contó después de desgranar todas las espigas cosechadas en las plantas.

Granos por espiga ($G \text{ E}^{-1}$); se calculó al dividir el número de granos /planta entre el número de espigas.

Rendimiento de grano ($RG, g \text{ PI}^{-1}$); se obtuvo al pesar el número de granos/planta.

Índice de cosecha (IC); se calculó al dividir el rendimiento de grano/planta entre el peso seco de la parte aérea ($IC=RG/PSPA$).

Longitud de la raíz más larga ($LRML, \text{cm}$); una vez cosechada la parte aérea de las plantas, se procedió a sacar las bolsas de plástico de los tubos de PVC y se midió la longitud de la raíz visible más larga en cada bolsa con una regla de plástico graduada en cm.

Peso seco total de raíces ($PSTR, g \text{ PI}^{-1}$); se separaron las raíces del suelo con la ayuda de unas pinzas de disección y una criba metálica de 1.5 x 2 mm de apertura; las raíces se colocaron en sobres de papel y se llevaron a la estufa durante 48 h a una temperatura de 70 °C, para obtener el peso seco con una balanza de precisión marca Sartorius, modelo GMBH tipo 1601AMP8-1.

Biomasa total ($BMT, g/\text{planta}$); se obtuvo al sumar el peso seco de la parte aérea y el peso total de raíces ($BMT=PSPA+PSTR$).

Índice de cosecha modificado (ICr); se calculó al dividir el rendimiento de grano entre la biomasa total, incluyendo raíces ($ICr=RG/BMT$).

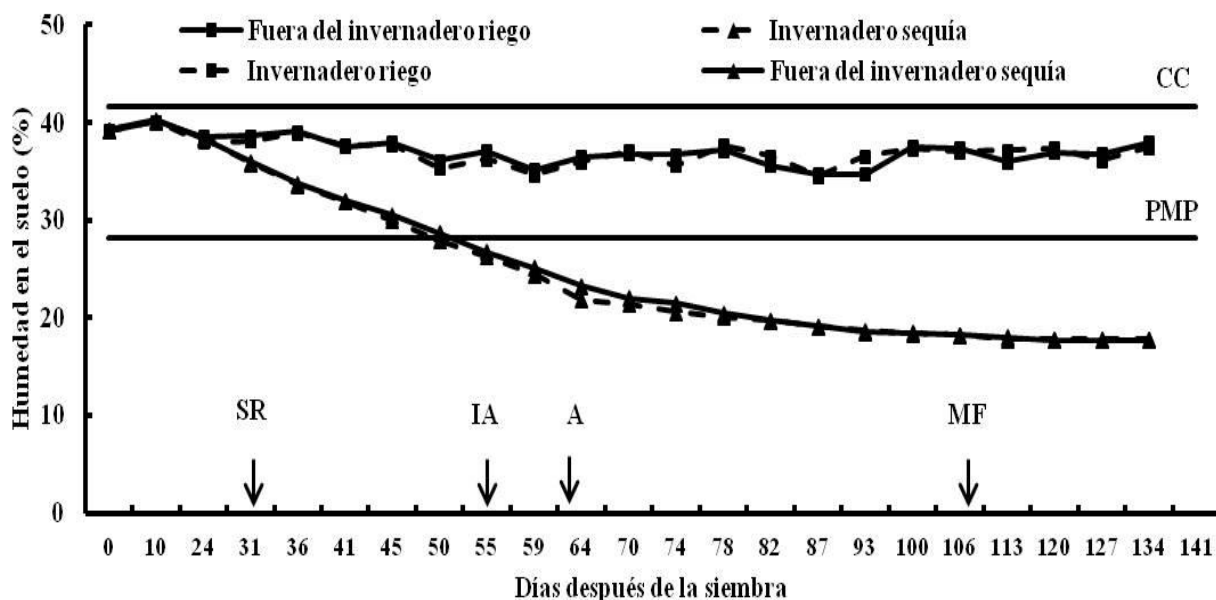
Cociente raíz/parte aérea ($CRPA$); se calculó al dividir el peso seco total de raíces entre el peso seco de la parte aérea ($CRPA=PSTR/PSPA$).

Contenido y manejo de humedad en el suelo

Una vez que las bolsas de plástico se llenaron con tierra en cada tubo de PVC, se procedió a agregar agua hasta que se alcanzó el punto de saturación; los tubos se pesaron 16 h después, para determinar el peso inicial del tubo a CC (PICC), una vez que cesó el escurrimiento del exceso de agua en los tubos. El contenido de humedad edáfica se monitoreó mediante el método gravimétrico semanalmente entre la siembra y la etapa de floración, utilizando una balanza electrónica marca Tecno cor, modelo AC 100, serie 001730 con precisión de 5 g; posteriormente la aplicación de agua se hizo con menor frecuencia durante el periodo de llenado del grano.

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

Figura 1. Contenido de humedad edáfica fuera del invernadero y en condiciones de invernadero con riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2016. Montecillo, Texcoco, Estado de México. CC= Capacidad de campo; PMP=Porcentaje de marchitez permanente; SR=Suspensión de riego; IA=Inicio de antesis; A=Antesis; MF=Madurez fisiológica

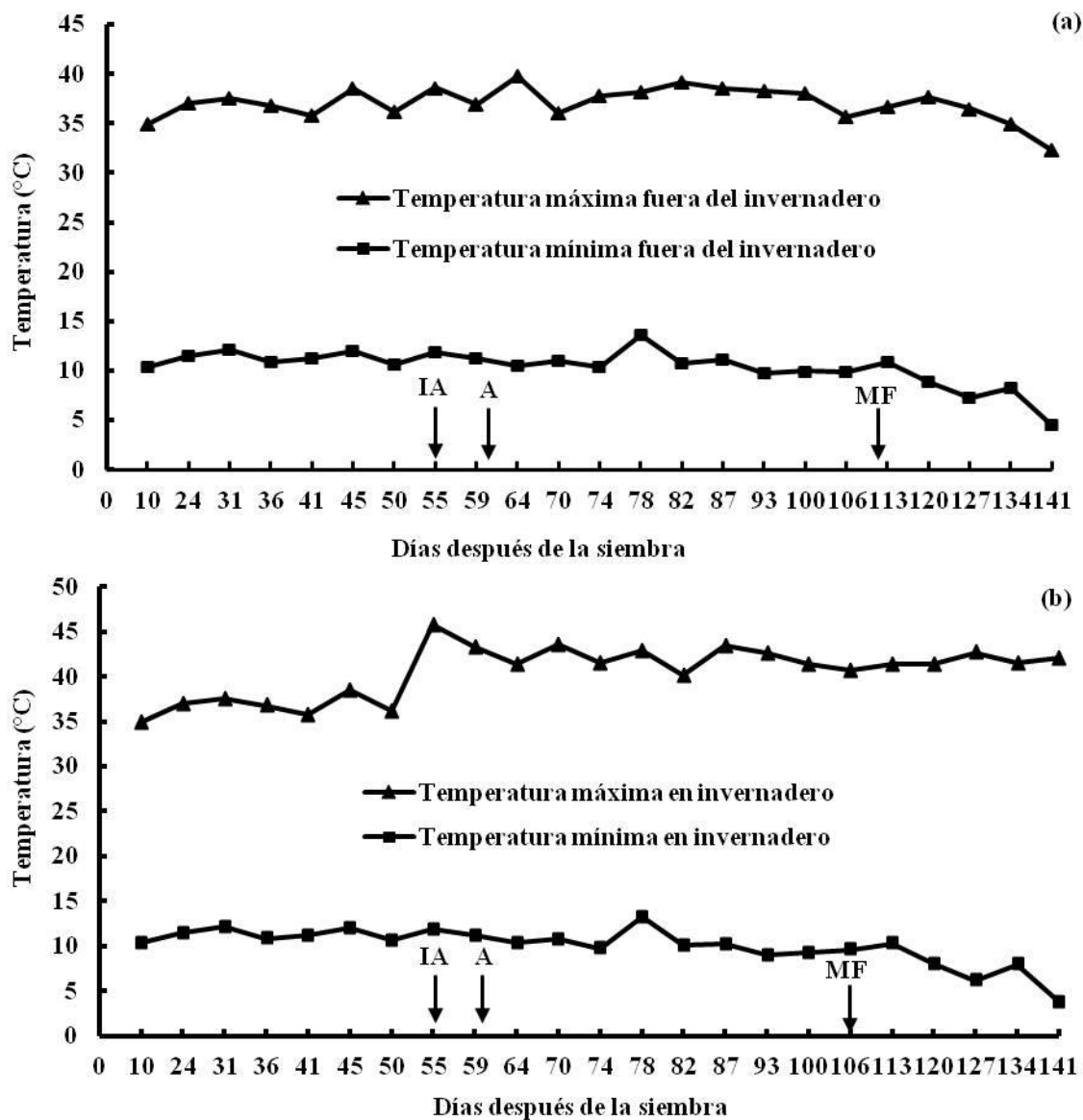


Datos de temperatura

La temperatura mínima y máxima del aire se registró tanto fuera como dentro del invernadero, con dos registradores electrónicos de datos (Datalogger) Modelo U12, marca HOBO, programados a intervalos de 15 min y colocados a una altura de 1.8 m sobre nivel del piso (Figura 2a y b).

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

Figura 2. Temperatura máxima y mínima del aire promedio semanal fuera del invernadero (a) y en condiciones de invernadero. Ciclo verano-otoño, 2016. Montecillo, Texcoco, Estado de México. IA=Inicio de la antesis; A=Antesis y MF=Madurez fisiológica



Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

Análisis estadístico

El análisis de varianza se calculó, al utilizar el programa SAS versión 9.1 para Windows (SAS, 2009), bajo el modelo estadístico: $Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + C_k + AC_{ik} + BC_{jk} + ABC_{ijk} + E_{ijkl}$, donde μ es la media general, i representa los niveles del ambiente (A), j los niveles de humedad edáfica (B), k los genotipos de cebada y trigo, y l las repeticiones de cada combinación; Y_{ijkl} es la variable de respuesta en la repetición l del nivel i de A, nivel j de B y nivel k del factor C. La comparación de medias se hizo al utilizar la diferencia mínima significativa (DMS, $P \leq 0.05$).

Resultados

Contenido de humedad en el suelo y temperatura del aire

El contenido hídrico del suelo en riego fuera del invernadero y en condiciones de invernadero se mantuvo cerca de CC, sin que las plantas experimentaran estrés hídrico desde la siembra hasta la madurez fisiológica, mientras en sequía la aplicación de riego se suspendió a los 31 dds y el contenido hídrico edáfico fue disminuyendo durante el ciclo biológico de las plantas, alcanzando un nivel por debajo del PMP durante las etapas de espigamiento, antesis, llenado del grano y madurez fisiológica (Figura 1).

Las temperaturas máxima y mínima del aire fuera del invernadero y en condiciones de invernadero fueron similares durante el ciclo biológico de las plantas, excepto, la temperatura máxima en el invernadero que fue más alta que fuera del invernadero, desde el inicio de la antesis (55 dds), etapa en la que las plantas fueron transferidas al invernadero hasta la madurez fisiológica (Figura 2).

Efecto del ambiente de temperatura

La alta temperatura registrada en condiciones de invernadero después de la antesis redujo 16, 17 y 7 %, el rendimiento de grano, número de espigas por planta y altura de planta; las otras características determinadas en las plantas no mostraron efecto significativo de la alta temperatura (Tabla 3).

Efecto del nivel de humedad en el suelo

La sequía o deficiencia hídrica del suelo tuvo mayor efecto que el ambiente de temperatura en el rendimiento de grano y sus componentes, y otras características determinadas en las plantas; la sequía disminuyó 80, 71, 68, 36, 39, 65, 74, 36 y 25 % el rendimiento de grano, el peso seco de la parte aérea, biomasa total, índice de cosecha, índice de cosecha modificado, espigas/planta, granos/planta, granos por espiga y altura de planta; la madurez fisiológica en condiciones de sequía ocurrió antes que en condiciones de riego (Tabla 4). El peso seco total de raíces, longitud de raíz más larga, cociente de raíz/parte aérea y peso seco de raíces en los estratos de 20-40, 40-60, 60-80



iniap

21 y 22 de
septiembre de 2017

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

y 80-100 cm fueron mayores en sequía que en riego (Tabla 4). La fecha de antesis fue similar en riego y sequía (Tabla 4).

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

Tabla 3. Rendimiento de grano (RG), peso seco de la parte aérea (PSPA), peso seco total de raíces (PSTR), biomasa total (BMT), longitud de la raíz más larga (LRML), índice de cosecha (IC), índice de cosecha modificado (ICr), cociente de raíz/parte aérea (CRPA), espigas por planta (E PI⁻¹), granos por planta (G PI⁻¹), granos por espiga (G E⁻¹), altura de planta (AP), antesis (A) y madurez fisiológica (MF), y peso seco de raíces en distintos estratos de suelo en diferentes ambientes de temperatura. Ciclo verano-otoño 2016, Montecillo, Texcoco, Estado de México

Ambiente de temperatura	RG (g PI ⁻¹)	PSPA (g PI ⁻¹)	PSTR (g PI ⁻¹)	BMT (g PI ⁻¹)	LRML (cm)	IC	ICr	CRPA	E PI ⁻¹	G PI ⁻¹	G E ⁻¹	AP (cm)	A (°Cd)	MF (°Cd)	Peso seco de raíces (g PI ⁻¹)				
															0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Fuera del invernadero	6.4	14.7	0.67	15.4	72.9	0.39	0.37	0.068	7.1	149.1	22.0	62.7	1493	2951	0.33	0.15	0.10	0.07	0.03
Invernadero	5.4	14.0	0.69	14.7	71.7	0.36	0.34	0.071	5.9	133.9	22.7	58.4	1456	2638	0.35	0.15	0.11	0.06	0.03
DMS (P≤0.05)	0.7	1.7	0.15	1.8	2.8	0.03	0.03	0.011	1.0	18.3	3.1	2.4	56	367	0.07	0.04	0.03	0.02	0.01

Tabla 4. Rendimiento de grano (RG), peso seco de la parte aérea (PSPA), peso seco total de raíces (PSTR), biomasa total (BMT), longitud de la raíz más larga (LRML), índice de cosecha (IC), índice de cosecha modificado (ICr), cociente de raíz/parte aérea (CRPA), espigas por planta (E PI⁻¹), granos por planta (G PI⁻¹), granos por espiga (G E⁻¹), altura de planta (AP), antesis (A) y madurez fisiológica (MF), y peso seco de raíces en distintos estratos de suelo en diferentes niveles de humedad edáfica. Ciclo verano-otoño 2016, Montecillo, Texcoco, Estado de México

Nivel de humedad edáfica	RG (g PI ⁻¹)	PSPA (g PI ⁻¹)	PSTR (g PI ⁻¹)	BMT (g PI ⁻¹)	LRML (cm)	IC	ICr	CRPA	E PI ⁻¹	G PI ⁻¹	G E ⁻¹	AP (cm)	A (°Cd)	MF (°Cd)	Peso seco de raíces (g PI ⁻¹)				
															0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Riego	9.8	22.3	0.51	22.8	54.7	0.45	0.44	0.020	9.6	225.2	27.2	69.2	1484	3148	0.36	0.09	0.04	0.02	0.01
Sequia	2.0	6.4	0.85	7.2	89.9	0.29	0.27	0.119	3.4	57.9	17.5	51.9	1465	2441	0.32	0.20	0.17	0.11	0.05
DMS (P≤0.05)	0.7	1.7	0.15	1.8	2.8	0.03	0.03	0.011	1.0	18.3	3.1	2.4	56	368	0.07	0.04	0.03	0.02	0.01

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

Efecto de la temperatura del ambiente y el nivel de humedad edáfica en cebada y trigo

Los genotipos de cebada mostraron mayor rendimiento de grano, peso seco de la parte aérea, peso seco de raíz y biomasa total que los genotipos de trigo fuera del invernadero y en condiciones de invernadero con riego y sequía (Figuras 3a, b, c y d). El índice de cosecha de cebada fuera del invernadero con riego y sequía fue mayor que el índice de cosecha de trigo, mientras en condiciones de invernadero, los genotipos de trigo exhibieron mayor índice de cosecha que los genotipos de cebada con riego y un índice de cosecha similar con sequía (Figura 3e). Fue notorio observar que los genotipos de cebada mostraron mayor acumulación de materia seca en el sistema radical que trigo fuera del invernadero e invernadero con riego y sequía, pero las diferencias entre especies fueron aún mayores en condiciones de invernadero con sequía (Figura 3c).

La respuesta de cebada y trigo a la alta temperatura en condiciones de invernadero con riego y sequía fue diferente a la respuesta observada fuera del invernadero; la alta temperatura en el invernadero disminuyó 30, 10, 9 y 22 % el rendimiento de grano, peso seco de la parte aérea, biomasa total e índice de cosecha de cebada en condiciones de riego, y 25 y 27 % el rendimiento de grano e índice de cosecha bajo condiciones de déficit hídrico, mientras el peso seco total de raíces y biomasa total de trigo se redujo 37 y 1 % en riego, y el peso seco de la parte aérea, peso seco total de raíces y biomasa total se redujo 5, 19 y 4 % en sequía (Tabla 5).

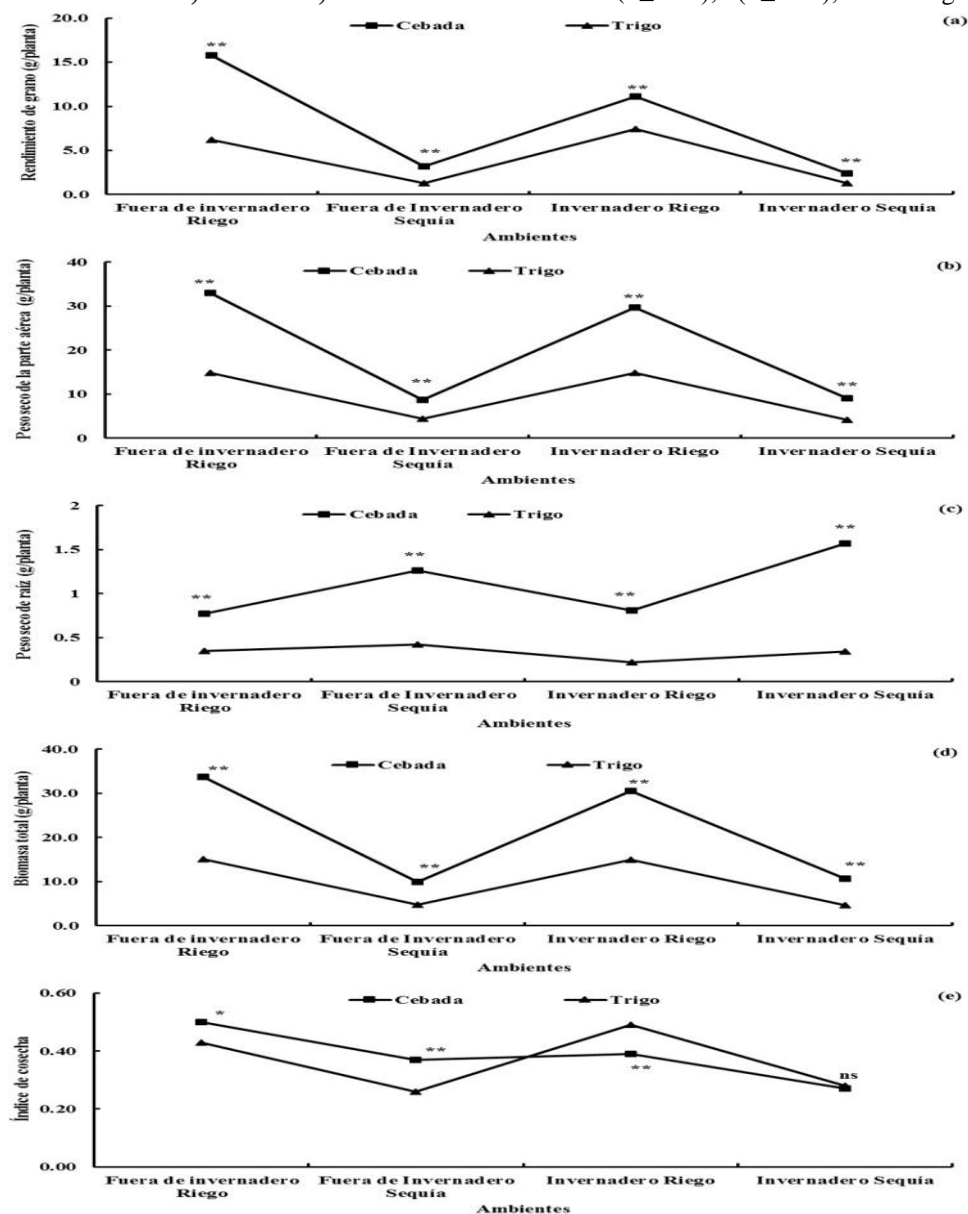
Por otra parte, la alta temperatura en el ambiente de invernadero aumentó 5 % el peso seco total de raíces en riego y 3, 25 y 7 % el peso seco de la parte aérea, peso seco total de raíces y biomasa total en sequía, mientras en trigo la alta temperatura aumentó 19 y 14 % el rendimiento de grano e índice de cosecha en riego y 8 % el índice de cosecha en condiciones de déficit hídrico (Tabla 5).

Tabla 5. Porcentaje de cambio entre ambientes de temperatura para el rendimiento de grano (RG), peso seco de la parte aérea (PSPA), peso seco total de raíces (PSTR), biomasa total (BMT=PSPA+PSTR) e índice de cosecha de cebada y trigo fuera del invernadero y en condiciones de invernadero con riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2016, Montecillo, Texcoco, Estado de México

Cambio entre ambientes de temperatura	Cebada					Trigo				
	RG	PSPA	PSTR	BMT	IC	RG	PSPA	PSTR	BMT	IC
Cambio en riego	-30	-10	+5	-9	-22	+19	0	-37	-1	+14
Cambio en sequía	-25	+3	+25	+7	-27	0	-5	-19	-4	+8

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

Figura 3. Rendimiento de grano (a), peso seco de la parte aérea (b), peso seco total de raíces (c), biomasa total (d) e índice de cosecha (e), para 15 genotipos de cebada y 18 genotipos de trigo fuera del invernadero y en condiciones de invernadero con riego y sequía. Ciclo verano-otoño, 2016. Montecillo, Texcoco, Estado de México ** ($P \leq 0.01$); * ($P \leq 0.05$); ns= no significativo



Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

Finalmente, se determinó que el rendimiento de grano tuvo correlación positiva y significativa con el peso seco de la parte aérea, biomasa total, índice de cosecha, índice de cosecha modificado, espigas/planta, granos/planta, granos/espiga y altura de planta, y correlación negativa y significativa con la longitud de la raíz más larga, cociente raíz/parte aérea y antesis (Tabla 6). El peso seco de la parte aérea se relacionó positiva y significativamente con el peso seco total de raíces, biomasa total, índice de cosecha, índice de cosecha modificado, espigas/planta, granos/planta, granos/espiga y altura de planta, y negativa y significativamente con la longitud de la raíz más larga y cociente raíz/parte aérea; el peso seco total de raíces tuvo correlación positiva y significativa con la biomasa total y longitud de la raíz más larga, y correlación negativa y significativa con el índice de cosecha e índice de cosecha modificado; la biomasa total se relacionó positiva y significativamente con el índice de cosecha, índice de cosecha modificado, espigas/planta, granos/planta, granos/espiga y altura de planta, y negativa y significativamente con la longitud de la raíz más larga y el cociente raíz/parte aérea; la longitud de la raíz más larga se relacionó positiva y significativamente con el cociente raíz parte aérea y negativa y significativamente con el índice de cosecha, índice de cosecha modificado, espigas/planta, granos/planta, granos/espiga, altura de planta y madurez fisiológica. El índice de cosecha se relacionó positiva y significativamente con el índice de cosecha modificado, espigas/planta, granos/planta, granos/espiga y altura de planta, y negativa y significativamente con el cociente raíz/parte aérea. El índice de cosecha modificado se correlacionó positiva y significativamente con espigas/planta, granos/planta, granos/espiga y altura de planta y negativa y significativamente con el cociente raíz/parte aérea y antesis. El cociente raíz/parte aérea se relacionó negativa y significativamente con espigas/planta, granos/planta, granos/espiga, altura de planta y madurez fisiológica. Espigas/planta se relacionó positiva y significativamente con granos/planta, altura de planta y madurez fisiológica. Granos/planta se relacionó positiva y significativamente con granos/espiga y altura de planta, y negativa y significativamente con antesis. Granos/espiga se relacionó positiva y significativamente con altura de planta y negativa y significativamente con antesis (Tabla 6).

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

**Tabla 6.
Coeficientes de**

correlación entre el rendimiento de grano y sus componentes en promedio de ambientes de temperatura y niveles de humedad edáfica, para todos los genotipos de cebada y trigo. Ciclo verano-otoño, 2016. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

	RG	PSPA	PSTR	BMT	LRML	IC	ICr	CRPA	E PI ⁻¹	G PI ⁻¹	G E ⁻¹	AP	A	MF
RG		0.90**	-0.01ns	0.89**	-0.51**	0.56**	0.59**	-0.49**	0.66**	0.97**	0.57**	0.56**	-0.27**	0.08ns
PSPA			0.22**	0.99**	-0.37**	0.28**	0.31**	-0.35**	0.79**	0.87**	0.37**	0.56**	-0.11ns	0.09 ns
PSTR				0.28**	0.41**	-0.35**	-0.40**	0.73**	0.10ns	-0.02ns	-0.07ns	-0.14*	0.01ns	-0.06ns
BMT					-0.34**	0.26**	0.28**	-0.30**	0.78**	0.86**	0.36**	0.54**	-0.11ns	0.09ns
LRML						-0.54**	-0.59**	0.68**	-0.31**	-0.50**	-0.34**	-0.46**	0.07ns	-0.14*
IC							0.99**	-0.58**	0.18**	0.58**	0.68**	0.40**	-0.46**	0.06ns
ICr								-0.63**	0.20**	0.61**	0.67**	0.43**	-0.43**	0.07ns
CRPA									-0.36**	-0.48**	-0.28**	-0.51**	0.04ns	-0.14*
E PI ⁻¹										0.66**	-0.05ns	0.47**	-0.004ns	0.14*
G PI ⁻¹											0.60**	0.54**	-0.26**	0.09ns
G E ⁻¹												0.27**	-0.42**	-0.04ns
AP													-0.02ns	0.11ns
A														0.10ns
MF														

RG= Rendimiento de grano (g PI⁻¹); PSPA= Peso seco de la parte aérea (g PI⁻¹); PSTR= Peso seco total de raíces (g PI⁻¹); BMT= Biomasa total (g PI⁻¹); LRML= Longitud de raíz más larga (cm); IC= Índice de cosecha; ICr= Índice de cosecha modificado; CRPA= Cociente de raíz/parte aérea (PSPA/PSTR); E PI⁻¹= Espigas/planta; G PI⁻¹= Granos/planta; G E⁻¹=Granos/espiga; AP= Altura de planta (cm); A= Antesis (°Cd); MF= Madurez fisiológica (°Cd)

*P≤0.05; **P≤0.01; n.s.= no significativo

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

1. Conclusiones

La temperatura alta en condiciones de invernadero redujo el rendimiento de grano, el número de espigas por planta y la altura de planta.

El déficit hídrico del suelo disminuyó el rendimiento de grano y sus componentes, acortó el ciclo biológico de las plantas y aumentó la longitud de la raíz más larga, peso seco total de raíces, cociente raíz/parte aérea y el peso seco de raíces en los estratos del suelo de 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm.

Los genotipos de cebada mostraron mayor rendimiento de grano, peso seco de la parte aérea, peso seco de raíces y biomasa total que los genotipos de trigo fuera del invernadero y en condiciones de invernadero con riego y sequía; el índice de cosecha de cebada fue más alto que trigo fuera del invernadero con riego y sequía, y menor que trigo en condiciones de invernadero con riego, y similar a trigo en condiciones de invernadero con sequía.

La cebada mostró ser más sensitiva al calor y el déficit hídrico, al reducir su rendimiento de grano e índice de cosecha en mayor grado que trigo; la temperatura alta del ambiente de invernadero aumentó el peso seco total de raíces en cebada bajo riego y sequía, mientras en trigo, la temperatura alta disminuyó drásticamente el peso seco total de raíces en riego y sequía.

El rendimiento de grano se correlacionó estrechamente con el peso seco de la parte aérea, biomasa total y granos/planta; la biomasa total se relacionó estrechamente con el peso seco de la parte aérea y granos/planta se relacionó estrechamente con el peso seco de la parte aérea y la biomasa total.

Referencias

García, E. (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). México, D.F. 217 p.

López-Castañeda, C., R.A. Richards, G.D. Farquhar and R.E. Williamson. (1996). Seed and seedling characteristics contributing to variation in early vigor among temperate cereals. *Crop Science*, 36, 1257-1266.

López-Castañeda, C. (2011). Variación en rendimiento de grano, biomasa y número de granos en cebada bajo tres condiciones de humedad del suelo. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 907-918.

López-Castañeda, C. (2011). Green-revolution wheat: Variability in root characters between old and modern bread wheat cultivars from Mexico and the United States of America (Grant CN 09-367). Final Narrative Report. UC Mexus-CONACYT, Collaborative Grant Application. University of California, Riverside, CA, U.S.A. 35 p.

Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

Miranda-Domínguez, L.E., C. López-Castañeda, I. Benítez-Riquelme y J.A. Mejía-Contreras. (2016). Desarrollo radical y rendimiento en diferentes variedades de trigo, cebad y triticale bajo condiciones limitantes de humedad del suelo. *Terra Latinoamericana* 34(4): 393-407.

Reynolds, M.P., Hays, D., and Chapman, S. (2010). Breeding for adaptation to heat and drought stress. *In: Reynolds, M.P. (ed.), Climate change and crop production.* CPI Group (UK) Ltd, Croydon, CR0 4YY. 292 p.

Solano, H. S., Zamora, D. M., Gámez V. F. P., García, R. J. J., Sánchez, C. R., Ireta, M. J., Díaz, E. F., Garza, G. R. (2009). Alina, nueva variedad de cebada maltera para riego en El Bajío. *Agricultura Técnica en México*, 35(4), 471-473.

Sorrells, M.E., Diab, A. and This, D. (2006). Drought adaptation in barley. *In: Jean-Marcel Ribaut (ed.), Drought adaptation in cereals.* The Haworth Press Inc., 10 Alice Street, Binghamton, N.Y. 642 p.

Zamora, D. M., Solano, H. S., Gómez, M. R., Rojas, M. I., Ireta, M. J., Garza, G. R., Ortiz, T. C. (2008). Adabella: variedad de cebada maltera para valles altos de la mesa central de México. *Agricultura Técnica en México*, 34(4), 491-493.

Zamora, D. M., Solano, H. S., Garza, G. R., Islas, G. J., Huerta, Z. R., López, C. M. (2010). Armida, nueva variedad de cebada maltera para riego en El Bajío. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(5), 723-726.