

## EFFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO SOBRE EL RENDIMIENTO, CLOROFILA Y BIOMASA EN TRIGO

### EFFECT OF WATER STRESS ON YIELD, CHLOROPHYLL AND BIOMASS IN WHEAT

Juan Francisco Buenrostro Rodríguez<sup>1</sup>, Jorge Covarrubias Prieto<sup>1</sup>, Ernesto Solís Moya<sup>2</sup>, Lourdes Ledesma Ramirez<sup>2</sup>, Sarahyt S. González Figueroa<sup>2</sup>, Andrés Mandujano Bueno<sup>2</sup>, Hugo Cesar Cisneros López<sup>1</sup> y Alfredo Josué Gámez Vázquez<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Roque, Celaya, Guanajuato, México. <sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.

\*Autor de correspondencia (gamez.josue@inifap.gob.mx)

#### RESUMEN

Las variables asociadas a la respuesta del cultivo de trigo bajo condiciones de riego restringido son importantes, por lo que el objetivo del presente estudio fue identificar variedades con mayor rendimiento, el cual necesariamente está relacionado con variables fisiotécnicas que les permiten adaptarse a condiciones de estrés. Se evaluaron cuatro genotipos bajo riego completo y restringido en dos ambientes, campo y en casa sombra, en las localidades de Celaya y Salamanca, Guanajuato, México. En campo se utilizó un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas, la parcela grande correspondió a los calendarios de riego y la chica a los genotipos; se cuantificaron las variables rendimiento de grano, índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI), índice de clorofila, área foliar y temperatura del dosel. En casa sombra se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial, donde el primer factor fue la condición de humedad (con y sin estrés) y el segundo factor fueron los genotipos; se midió la acumulación de materia seca de la raíz, tallo, hoja y espiga. La mayor variabilidad del rendimiento se presentó entre localidades, la aplicación de cuatro riegos permitió un mayor rendimiento (14.1 %) e índice de clorofila (1.3 %) con respecto a la aplicación de tres riegos. En la localidad de Celaya se obtuvo mayor rendimiento de grano. La variedad Bárcenas S2002 presentó promedios superiores de rendimiento con 5.5 y 3.9 t ha<sup>-1</sup>, con cuatro y tres riegos respectivamente. En casa sombra sin estrés hídrico se obtuvo una mayor acumulación de materia seca en raíz, parte aérea, tallos y hojas. Las variables que dieron lugar a una respuesta diferencial fueron rendimiento, área foliar, NDVI y peso seco de raíz. La variedad Bárcenas S2002 presentó los mayores rendimientos en condiciones de riego restringido con base en reducción de la materia seca de la parte aérea y raíz y con menores reducciones en clorofila.

**Palabras clave:** Calendarios de riego, materia seca, rendimiento, riego restringido.

#### SUMMARY

Variables associated with the response of wheat under restricted irrigation conditions are important, so the aim of this study was to identify varieties with higher yields, which is necessarily related to physiotechnical variables that allow them to adapt to stress conditions. Four genotypes were evaluated under full and restricted irrigation in two environments, field and shade house in the localities of Celaya and Salamanca, Guanajuato, Mexico.

In the field, a complete randomized block design was used under a split-plot arrangement, the whole plot corresponded to the irrigation schedules and the split plot to the genotypes; The variables grain yield, normalized differential vegetation index (NDVI), chlorophyll index, leaf area and canopy temperature were quantified. In the house shade a completely randomized design with factorial arrangement was used, where the first factor was the moisture condition (with and without stress) and the second factor was the genotypes; the accumulation of dry matter of the root, stem, leaf and spike was measured. The greatest variability of yield occurred between localities, the application of four irrigations allowed a higher yield (14.1 %) and chlorophyll index (1.3 %), relative to the application of three irrigations. A higher grain yield was obtained at the locality of Celaya. The variety Bárcenas S2002 presented superior averages in yield with 5.5 and 3.9 t ha<sup>-1</sup> with four and three irrigations, respectively. In the house shade without water stress, a greater accumulation of dry matter was obtained in the root, aerial part, stems and leaves. The variables that gave rise to a differential response were yield, leaf area, NDVI and root dry weight. The variety Bárcenas S2002 presented the highest yields under restricted irrigation conditions based on reduced dry matter of the aerial part and root, with lower reductions in chlorophyll.

**Index words:** Dry matter, irrigation schedules, restricted irrigation, yield.

#### INTRODUCCIÓN

En 2021 a nivel nacional se produjeron 3.2 millones de toneladas de grano de trigo (SIAP, 2023) y el consumo *per cápita* fue de 61.4 kg (Statista, 2023). El estado de Guanajuato aportó el 10.9 % de la producción total (SIAP, 2023); en la entidad existen diversos factores que afectan el crecimiento y desarrollo del cultivo, pues tiene procesos complejos con muchos componentes que interactúan con el ambiente (Porter y Semenov, 2005). El estrés hídrico (restricción de riego o sequía) es uno de los factores ambientales que limitan el crecimiento, rendimiento (Ali *et al.*, 2018) y la calidad del cultivo (Prasad *et al.*, 2008), éste es considerado el estrés abiótico de mayor incidencia en el crecimiento de las plantas (Gao *et*

*al.*, 2007). Respuestas importantes del cultivo involucran la resistencia y la etapa del ciclo del cultivo en que ocurre (Zhang *et al.*, 2011).

Las plantas utilizan estrategias para resistir el estrés hídrico en el cual se involucra un conjunto de respuestas que conllevan a evitarlo o tolerarlo, y están estrechamente relacionadas con las características genotípicas del cultivo en cuestión, que pueden implicar la evasión, escape y tolerancia (Moreno, 2009). Dentro de los mecanismos de resistencia de las plantas, se encuentran el desarrollo temprano de precocidad entre genotipos, la retención del agua disponible, a través de reducir el tamaño de la hoja y regular el cierre estomático, el uso eficiente del agua con un sistema de raíces mejorado y una menor pérdida en la productividad (Semenov *et al.*, 2009).

El peso de grano, según Joshi *et al.* (2007) y Nouri *et al.* (2011), puede variar debido al estrés térmico e hídrico causado por el aumento de la temperatura en anthesis y madurez fisiológica del grano. El riego restringido es una herramienta importante para evaluar tolerancia y reducir el consumo del agua de riego al aplicar agua por debajo de los requerimientos hídricos del cultivo (Feres y Soriano, 2007).

Por otro lado, uno de los caracteres relacionados con el rendimiento, del cual se han realizado pocos estudios genéticos, es la concentración de clorofila, estrechamente relacionada con la capacidad fotosintética y etapa de desarrollo del cultivo (Wu *et al.*, 2023). Se ha demostrado que aumentar la tasa de fotosíntesis favorece el rendimiento de los cultivos, pues la materia seca producida depende totalmente de este proceso (Kubar *et al.*, 2022). La reducción en el contenido en clorofila se ha atribuido al estrés hídrico (Valverde *et al.*, 2021).

En trigo se han observado diferencias en la tasa de fotosíntesis neta entre cultivares a altas temperaturas y tales diferencias están asociadas con una reducción en la concentración de clorofila de la hoja durante el periodo de llenado del grano (Reynolds *et al.*, 2000); además, se ha reportado asociación genética entre el contenido en clorofila y el rendimiento (Gutiérrez-Rodríguez *et al.*, 2000; Reynolds *et al.*, 2000); esto explica el interés de este carácter en la mejora de los cereales (González, 2009). Aunque la interceptación de la energía solar y su uso en la fotosíntesis es la base del rendimiento del cultivo, existen conclusiones contradictorias sobre el papel de la tasa de fotosíntesis en la determinación del rendimiento (Guan *et al.*, 2015). Varios investigadores no reportan ningún cambio, o incluso una reducción, en la tasa de fotosíntesis asociada con un mayor rendimiento (Reynolds *et al.*, 2000, Richards 2000). Martínez y Guiamet (2004) reportaron que el índice del valor SPAD (Análisis de Desarrollo Suelo-Planta,

por sus siglas en inglés) tiende a ser mayor en hojas de trigo con un bajo contenido relativo en agua. Fotovat *et al.* (2007) informaron que el contenido de clorofila foliar disminuía significativamente bajo un estrés hídrico severo respecto a plantas con una mayor disponibilidad hídrica en siete cultivares de trigo.

El índice de área foliar (IAF) permite estimar la capacidad fotosintética de las plantas y ayuda a entender las relaciones entre acumulación de biomasa y rendimiento (Castellanos *et al.*, 2017). El índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) se emplea como un indicador de la biomasa del dosel, IAF, radiación interceptada y capacidad fotosintética de un cultivo (Goodwin *et al.*, 2018). Carlson y Ripley (1997) encontraron que la radiación interceptada y el IAF mostraron una correlación alta con el NDVI en trigo.

Las técnicas actuales de fitomejoramiento tienen como base la selección visual de características de la parte aérea de las plantas, lo que podría estar indirectamente relacionado con la selección de caracteres de raíz (Herrera *et al.*, 2013). La identificación de características de la raíz ofrece buen potencial para aumentar el rendimiento de grano en situaciones con y sin estrés hídrico; sin embargo, esta posibilidad, debido a lo complejo de su evaluación, ha sido poco explorada (Herrera *et al.*, 2013). El objetivo del presente estudio fue identificar variables fisiotécnicas asociadas con la respuesta a rendimiento de genotipos experimentales y comerciales de trigo, bajo riego restringido.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en campo con tres y cuatro aplicaciones de riego (CR) y en casa sombra, con y sin estrés hídrico.

### Evaluación en campo

#### Sitios experimentales

El experimento se estableció en dos localidades en el ciclo otoño-invierno 2019/2020. La primera localidad fue en el Campo Experimental Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), localizado en Celaya, Guanajuato, México a los 20° 35' 21.0" latitud norte y los 100° 49' 42.7" longitud oeste, y la segunda en San José de los Duros, Salamanca, Guanajuato, México (20° 33' 40.0" latitud norte y 101° 15' 23.7" longitud oeste). Las siembras se realizaron el 19 de diciembre de 2019 y 2 de enero de 2020, respectivamente.

### Material genético

Se evaluaron cuatro líneas experimentales y dos variedades comerciales liberadas por el INIFAP, como se muestra en el Cuadro 1.

### Tratamientos

Los tratamientos se generaron con la combinación de los genotipos y dos regímenes de humedad, resultado de la aplicación de dos calendarios de riego (CR), el primero de cuatro riegos, a los 0-45-75-100 dds y el segundo de tres riegos, a los 0-45-75 dds; la lámina de riego al momento de la siembra fue de 12 cm y en el resto de riegos durante el desarrollo del cultivo fue de 10 cm.

### Diseño y unidad experimental

El experimento se estableció en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones con arreglo en parcelas divididas, donde la parcela grande correspondió a los calendarios de riego y la parcela chica, a los genotipos; la unidad experimental fue de cuatro surcos de 3 m de largo a doble hilo (9 m<sup>2</sup>), la parcela útil fueron los dos surcos centrales.

### Manejo del cultivo

La siembra se realizó bajo el sistema de labranza tradicional con separación entre surcos de 75 cm, con una densidad de 120 kg ha<sup>-1</sup> de semilla, producida un ciclo previo a su evaluación. La fertilización fue 240-60-00, la mitad del nitrógeno y todo el fósforo se aplicó en la siembra y el resto del nitrógeno antes del primer riego de auxilio, en encañe (45 días después de la siembra, dds).

### VARIABLES EVALUADAS

En la etapa de espigamiento (90 dds) se evaluó el índice de clorofila (IC) con el sensor CM-100 Fieldscout (Spectrum Technologies, Inc., Bridgend, Reino Unido), índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI)

con el Greenseeker (Trimble Agriculture, Westminster, Colorado, EUA), índice de área foliar (IAF) con el sensor LP-80 (Marca AccuPAR, Pullman, Washington, EUA) y temperatura del dosel (Temp) con el sensor Dual Laser 50" (Extech Instruments, Nashua, New Hampshire, EUA). El rendimiento de grano se evaluó cuando éste alcanzó 14 % de humedad.

### Evaluación en casa sombra

#### Condiciones experimentales

La casa sombra se estableció en el Campo Experimental Bajío del INIFAP durante el ciclo OI 2020-2021, con los mismos genotipos utilizados en el experimento de campo, descritos en el Cuadro 1.

#### Tratamientos

Los tratamientos resultaron de la combinación de los genotipos descritos en el Cuadro 1 y dos condiciones de humedad: a) sin estrés hídrico, donde la humedad del suelo se mantuvo por arriba del 50 % de humedad aprovechable, y b) con estrés hídrico, el cual consistió en mantener a las plantas durante 24 horas en el punto de marchitez permanente (PMP) en tres ocasiones, en encañe (48 dds), espigamiento (71 dds) y llenado de grano (78 dds); posteriormente, el suelo se llevó a capacidad de campo (CC).

#### Diseño y unidad experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial y cuatro repeticiones. La siembra se realizó con el suelo a capacidad de campo el 22 de diciembre de 2020, en bolsas plásticas de 10 kg. Cada bolsa fue dispuesta una a lado de otra. La densidad de siembra fue de 120 kg ha<sup>-1</sup> de semilla; la dosis total de fertilización fue 240-60-00, 50 % del nitrógeno y 100 % del fósforo se aplicaron en la siembra y el 50 % del nitrógeno restante, en etapa de encañe (48 dds).

**Cuadro 1. Genotipos de trigo evaluados.**

Número	ID	Genealogía
2	A	Corocoro/3/Pasa/Ciria//Ene (Corocoro)
6	B	Kauz//Altar84/Aos/3/Milan/Kauz/4/Huites/5/C80.1/3*B (Kauz)
14	C	Bárceñas S2002 (Bárceñas)
15	D	Norteña F2007 (Norteña)

ID: identificador, A y B: líneas experimentales, C y D: variedades liberadas por el INIFAP.

### VARIABLES EVALUADAS

A los 85 dds se determinaron las variables peso seco de la parte aérea (PSPA); para ello, las plantas se cortaron desde el cuello de la raíz y se disectaron en tallos, vainas, hojas y espigas para llevarlos a peso seco constante (g), sometiéndolos durante 48 horas a 110 °C en un horno de 120 V (Modelo LW201C, Despatch Thermal Processing Technology, Minneapolis, Minnesota, EUA); peso seco de la raíz (PSR), el suelo de cada unidad experimental se lavó para obtener la masa radical, la cual se llevó a peso seco constante (g) sometiéndola durante 24 h a 110 °C; la relación raíz/parte aérea (RPA) se calculó al dividir el peso seco de la raíz entre la suma del peso seco de todos los órganos de la parte aérea.

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos de campo se sometieron a análisis de varianza combinado y los de casa sombra al análisis factorial de un diseño completamente al azar. En campo, la comparación múltiple de medias se realizó con la diferencias significativa honesta (DSH) de Tukey ( $P \leq 0.05$ ), además de un análisis de componentes principales y de interacción genotipo-ambiente (IGA) mediante el modelo SREG, con el paquete SAS versión 9.3 (SAS Institute, 2011), donde los ambientes fueron la combinación de las dos localidades y los dos

calendarios de riegos (cuatro ambientes).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### ANÁLISIS COMBINADO A TRAVÉS DE LOCALIDADES EN CAMPO

Se observaron diferencias (Cuadro 2) entre localidades ( $P \leq 0.01$ ), con la mayor variabilidad en rendimiento en grano (64.2 %), índice de clorofila (71.2 %), NDVI (92.3 %), índice de área foliar (67.9 %) y temperatura del dosel (98.7 %). Los calendarios de riego (CR) siguieron en importancia con diferencias ( $P \leq 0.01$ ) en rendimiento de grano, índice de clorofila, NDVI e índice de área foliar. Entre genotipos se detectaron diferencias ( $P \leq 0.01$ ) para rendimiento de grano, índice de clorofila, NDVI e índice de área foliar. Los CR y los genotipos no generaron diferencias estadísticas en temperatura del dosel. Con respecto a las interacciones estudiadas, los resultados indican que Localidades  $\times$  Genotipos fue la más importante, al detectarse diferencias estadísticas en la expresión de todas las variables evaluadas ( $P \leq 0.01$ ), y sólo para rendimiento de grano y temperatura del dosel con  $P \leq 0.05$ . La interacción Localidades  $\times$  Calendarios de riego generó diferencias ( $P \leq 0.01$ ) en NDVI y temperatura del dosel.

**Cuadro 2. Cuadros medios de los caracteres medidos en cuatro genotipos de trigo evaluados con dos calendarios de riego durante el ciclo otoño-invierno 2019/2020 en el Campo Experimental Bajío y San José de los Duros, Guanajuato, México.**

Fuentes de variación	GL	Rendimiento	Índice clorofila	NDVI	Índice área foliar	Temperatura dosel
Localidades (L)	1	22278400.0 **	1349663.1 **	0.77220 **	78.5 **	1255.8 **
Rep/L	6	49411.5	4668.3	0.00521	0.7	8.5
Calendario de riegos (CR)	1	7854006.3 **	49284.0 **	0.00098	6.6 **	0.3
L $\times$ CR	1	664225.0	181263.1 **	0.00004	21.3 **	2.2
L $\times$ CR/Rep	6	144265.6	2069.9	0.00077	0.5	0.8
Genotipos (G)	3	569806.3 **	84252.3 **	0.03078 **	3.2 **	0.3
L $\times$ G	3	1396975.0 *	40784.4 **	0.02121 **	4.2 **	2.2 *
CR $\times$ G	3	318472.9	80709.7 **	0.00149	0.1	0.6
L $\times$ C R $\times$ G	3	1440916.7 **	103612.2 **	0.00118	0.2	0.3
Residual		135812.5	1797.9	0.00045	0.7	2.0
CV % (L)		4.8	17.1	11.8	16.9	8.9
CV % (CR)		8.2	12.2	8.4	16.6	2.7
CV % (G)		7.3	11.3	6.3	18.0	2.9

GL: grados de libertad, NDVI: índice de vegetación normalizado, \* y \*\*: diferencias estadísticas con  $P \leq 0.05$  y  $P \leq 0.01$ , respectivamente, CV: coeficiente de variación.

**Comparación de medias**

La localidad de Celaya superó a la localidad de Salamanca en todas las variables, con excepción de la temperatura del dosel y rendimiento de grano con 1.18 t ha<sup>-1</sup> (Cuadro 3). Los valores del índice de clorofila, NDVI e índice de área foliar obtenidos en Celaya fueron 2.1, 2.4 y 1.6 veces más altos que en Salamanca, respectivamente, lo que coincide con lo reportado por Castellanos *et al.* (2017). Los menores valores de temperatura del dosel registrados en Celaya se atribuyen al follaje y biomasa que dieron lugar a condiciones más frescas para el cultivo. Con base en lo anterior, una menor temperatura del dosel de los materiales evaluados se asocia con una mayor actividad fisiológica y acumulación de materia seca, lo que coincide con lo reportado por Rosabal *et al.* (2014).

La variedad Bárcenas produjo el mayor rendimiento de grano y fue estadísticamente igual al de Corocoro y superior al resto de los genotipos. En índice de clorofila y NDVI, Kauz fue superior numéricamente y se ubicó en el grupo estadístico sobresaliente al resto de los genotipos. En índice de área foliar, Kauz fue igual a Norteña y superior al resto; finalmente, en temperatura del dosel no se observaron diferencias estadísticas (Cuadro 4).

La restricción de un riego redujo el rendimiento en 700 kg ha<sup>-1</sup>, equivalente a 14.1 % (Cuadro 5). El resultado anterior concuerda con los resultados de Ledesma *et al.* (2010) y Paquini-Rodríguez *et al.* (2016), quienes reportaron una reducción de 870 y 680 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente, en condiciones de campo similares. De igual forma, el índice de clorofila disminuyó por el número de CR; la aplicación de cuatro riegos superó en 55.5 unidades al de tres riegos. Por otro lado, el riego restringido favoreció la expresión del índice de área foliar, que fue 1.14 veces mayor en comparación al obtenido con cuatro riegos, lo que coincide con los reportes de González (2009).

La prueba Tukey no detectó diferencias estadísticas entre los CR para NDVI y temperatura del dosel, confirmando los resultados del análisis de varianza (Cuadro 2).

**Análisis de interacción genotipo-ambiente**

El modelo SREG explicó 88.9 % de la varianza total. Entre las localidades, Celaya presentó el mayor rendimiento con cuatro y tres riegos, seguido por la localidad de Salamanca con cuatro y tres riegos. La variedad Bárcenas tuvo mayor respuesta al riego restringido en ambas localidades, lo cual respalda los resultados del Cuadro 4. Por otro lado, se

**Cuadro 3. Comparaciones de medias entre localidades de los caracteres medidos en cuatro genotipos de trigo evaluados con dos calendarios de riego durante el ciclo otoño-invierno 2019/20 en el Campo Experimental Bajío y San José de los Duros, Guanajuato, México.**

Localidad	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	Índice clorofila	NDVI	Índice de área foliar	Temperatura dosel (°C)
Celaya	5200.9 a	545.2 a	0.721 a	5.9 a	28.3 b
Salamanca	4020.9 b	254.8 b	0.501 b	3.7 b	37.1 a
DSH (0.05)	161.5	25.7	0.02	0.4	0.4

Medias con letras iguales por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05).

**Cuadro 4. Comparaciones de medias entre cuatro genotipos de trigo de los caracteres medidos en dos calendarios de riego durante el ciclo otoño-invierno 2019/20 en el Campo Experimental Bajío y San José de los Duros, Guanajuato, México.**

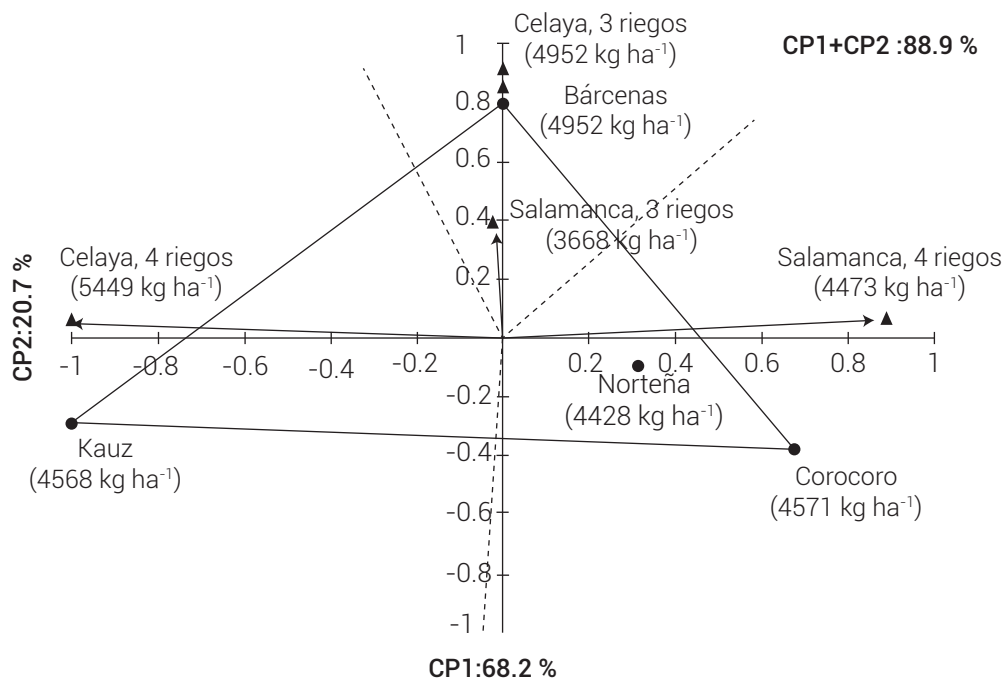
Genotipo	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	Índice de clorofila	NDVI	Índice área foliar	Temperatura dosel (°C)
Corocoro	4571.9 ab	319.7 c	0.614 a	4.6 b	32.7
Bárcenas	4875.6 a	376.0 b	0.552 b	4.5 b	33.0
Norteña	4428.1 b	411.5 b	0.624 a	4.9 ab	32.8
Kauz	4568.1 b	493.0 a	0.657 a	5.5 a	32.4
DSH (0.05)	307.2	48.9	0.05	0.8	

Medias con letras iguales por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05).

**Cuadro 5. Comparaciones de medias entre calendarios de riego de los caracteres medidos en cuatro genotipos de trigo evaluados durante los ciclos otoño-invierno 2019/2020 en el Campo Experimental Bajío y San José de los Duros, Guanajuato, México.**

Número de riegos	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	Índice de clorofila	NDVI	Índice área foliar	Temperatura dosel (°C)
3	4260.6 b	372.3 b	0.616	5.2 a	32.8
4	4961.3 a	427.8 a	0.608	4.5 b	32.7
DSH (0.05)	161.5	25.7		0.4	

Medias con letras iguales por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).



**Figura 1. Análisis SREG del rendimiento de cuatro genotipos de trigo evaluados con dos calendarios de riego durante el ciclo otoño-invierno 2019/2020 en el Campo Experimental Bajío y San José de los Duros. CP. componente principal.**

observa que la línea Kauz presentó un mayor rendimiento con la aplicación de cuatro riegos aplicados en Celaya, mientras que Corocoro expresó su mayor rendimiento en Salamanca, sin restricción de riego. La variedad Norteña presentó en Salamanca un rendimiento superior a la media con cuatro riegos y menor a éste en riego restringido (Figura 1).

#### Análisis de varianza en casa sombra

La fuente de variación que aportó mayor variabilidad fenotípica fueron los ambientes (Cuadro 6), conformados por las condiciones de humedad del suelo, entre las cuales

se generó 89.9 % en peso seco de raíz, 97.8 % en peso seco parte aérea, 95.9 % en peso seco tallo y 73.7 % en peso seco hoja; con excepción de la relación raíz/parte aérea, donde no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre los ambientes.

Entre los genotipos se observaron diferencias en la expresión de todas las variables, con excepción del peso seco de hojas, mientras que para la interacción Genotipo × Ambiente se observaron efectos significativos solamente en peso seco de raíz y tallo ( $P \leq 0.01$ ). Por otro lado, los valores más altos de peso seco se concentraron en el ambiente sin restricción de humedad, con excepción

**Cuadro 6. Cuadrados medios de los caracteres medidos en cuatro genotipos de trigo evaluados en dos condiciones de humedad (riego y estrés) durante el ciclo otoño-invierno 2020/2021 en el Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.**

FV	GL	Peso seco		Raíz / parte aérea	Peso seco	
		Raíz	Parte aérea		tallos	hojas
Ambientes (Amb)	1	178.0 **	1015.8 **	0.01	269.99 **	77.4 **
Rep/Amb	6	1.3	3.72	< 0.00	0.32	1.5
Genotipo (Gen)	3	14.5 **	12.9 *	0.05 **	7.81 **	23.5
Amb × Gen (IGA)	3	5.4 **	8.9	0.01	3.62 **	3.9
Residual	18	0.851	3.12	0.005	0.507	0.503
CV <sub>Amb</sub> (%)		19.3	14.0	17.8	10.2	27.8
CV <sub>Gen</sub> (%)		15.7	12.9	16.5	12.8	16.1

FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, CV: coeficiente de variación, \* y \*\*: diferencias estadísticas con  $P \leq 0.05$  y  $P \leq 0.01$ , respectivamente.

**Cuadro 7. Comparación de medias entre dos condiciones de humedad de los caracteres medidos en cuatro genotipos de trigo evaluados durante el ciclo otoño-invierno 2020/2021 en el Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.**

Ambiente	Peso seco raíz (g)	Peso seco parte aérea (g)	Raíz/parte aérea	Peso seco tallo (g)	Peso seco hojas (g)
Riego	8.2 a	19.3 a	0.4	8.4 a	5.5 a
Estrés	3.5 b	8.1 b	0.4	2.6 b	3.3 b
DSH (0.05)	0.99	1.67		0.49	0.77

Medias con letras iguales por columna, no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

**Cuadro 8. Comparación de medias de genotipos de trigo en caracteres medidos en dos condiciones de humedad durante el ciclo otoño-invierno 2020/2021 en el Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.**

Genotipo	Peso seco raíz (g)	Peso seco parte aérea (g)	Raíz/parte aérea	Peso seco tallo (g)	Peso seco hojas (g)
Corocoro	6.9 a	14.4 a	0.4 ab	6.5 a	3.2 b
Bárcenas	4.3 b	11.9 b	0.4 bc	4.3 c	3.4 b
Norteña	5.1 b	14.7 a	0.3 c	6.0 ab	5.6 a
Kauz	7.1 a	13.8 ab	0.5 a	5.2 bc	5.2 a
DSH (0.05)	1.30	2.50	0.10	1.01	1.00

Medias con letras iguales por columna, no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

de la relación raíz/parte aérea, donde no se encontraron diferencias estadísticas (Cuadro 7). El peso seco de la parte aérea (Cuadro 8) fue afectado por el estrés hídrico (2.4 veces menor), donde se observó un decremento en el peso seco del tallo (3.2 veces) y en menor medida del peso seco de la hoja (1.6 veces); el peso seco de la raíz prácticamente se redujo en la misma medida que el peso seco de la parte aérea (2.3 veces).

Entre genotipos (Cuadro 8), destaca estadísticamente el peso seco de la línea Corocoro en todas las variables, con excepción de peso seco de hojas, al igual que el peso seco de Kauz en todas las variables, con excepción del peso seco tallos. La variedad Norteña sobresalió en peso seco de la parte aérea, peso seco del tallo y peso seco de hojas; finalmente, la variedad Bárcenas presentó mejor adaptación al calendario de riego restringido, lo

que coincide con lo reportado por Ledesma-Ramírez *et al.* (2012), ya que redujo su biomasa en la parte aérea, índice de tallo, área foliar, NDVI e índice de clorofila, pero sus ajustes lo llevaron a ubicarse en el segundo grupo estadístico, lo cual le permitió mantener su actividad fisiológica.

### CONCLUSIONES

La variedad Bárcenas fue el genotipo con mayor rendimiento en condiciones de riego restringido con base en reducir la acumulación de materia seca en la parte aérea, raíz y con menores daños en la clorofila; además, ajustó su rendimiento y acumulación de materia seca, manteniendo su índice de clorofila en dichas condiciones. Norteña y Coroco se caracterizaron por presentar la mayor acumulación de materia seca en la parte aérea, la mayor reducción en el índice de clorofila, situación que se asocia con menor rendimiento en campo. La variedad que mayor rendimiento expresó en condiciones hídricas favorables fue Kauz al acumular materia seca en la raíz, NDVI e índice de área foliar, lo que le permitió presentar la menor temperatura en el dosel; además, expresó mayor capacidad para hidratarse e incrementar el área foliar, reducir su temperatura y al final elevar el rendimiento de grano, en dichas condiciones.

### BIBLIOGRAFÍA

- Ali S., Y. Xu, Q. Jia, I. Ahmad, T. Wei, X. Ren, ... and Z. Jia (2018) Cultivation techniques combined with deficit irrigation improves winter wheat photosynthetic characteristics, dry matter translocation and water use efficiency under simulated rainfall conditions. *Agricultural Water Management* 201:207-218, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.017>
- Carlson T. N. and D. A. Ripley (1997) On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* 62:241-252, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- Castellanos R. M. A., R. Valdés C., A. López G. and F. Guridi I. (2017) Mediciones de índices de verdor relacionadas con área foliar y productividad de híbrido de maíz. *Cultivos Tropicales* 38:112-116.
- Fereres E. and M. A. Soriano (2007) Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany* 58:147-159, <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Fotovat R., M. Valizadeh and M. Toorchi (2007) Association between water-use efficiency components and total chlorophyll content (SPAD) in wheat (*Triticum aestivum* L.) under well-watered and drought stress conditions. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 5:225-227.
- Gao J. P., D. Y. Chao and H. X. Lin (2007) Understanding abiotic stress tolerance mechanisms: recent studies on stress response in rice. *Journal of Integrative Plant Biology* 49:742-750, <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2007.00495.x>
- González A. (2009) Aplicación del medidor portátil de clorofila en programas de mejora de trigo y cebada. *Agroecología* 4:111-116.
- Goodwin A. W., L. E. Lindsey, S. K. Harrison and P. A. Paul (2018) Estimating wheat yield with normalized difference vegetation index and fractional green canopy cover. *Crop, Forage & Turfgrass Management* 4:1-6, <https://doi.org/10.2134/cftm2018.04.0026>
- Guan X. K., L. Song., T. C. Wang, N. C. Turner and F. M. Li (2015) Effect of drought on the gas exchange, chlorophyll fluorescence and yield of six different-era Spring wheat cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science* 201:253-266, <https://doi.org/10.1111/jac.12103>
- Gutiérrez-Rodríguez M., M. P. Reynolds and A. Larque-Saavedra (2000) Photosynthesis of wheat in a warm, irrigated environment: II. Traits associated with genetic gains in yield. *Field Crops Research* 66:51-62, [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00078-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00078-7)
- Herrera J. M., N. Verhulst y B. Govaerts (2013) Estrategias para la identificación de diversidad genética en rasgos del sistema radicular. In: Fitomejoramiento Fisiológico I: Enfoques Interdisciplinarios para Mejorar la Adaptación del Cultivo. M. Reynolds, A. Pask, D. Mullan y P. Chávez (eds.). CIMMYT. México, D. F. pp:97-108.
- Joshi A. K., B. Mishra, R. Chatrath, G. Ortiz F. and R. P. Singh (2007) Wheat improvement in India: present status, emerging challenges and future prospects. *Euphytica* 157:431-446, <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9385-7>
- Kubar M. S., K. S. Alshallash, M. A. Asghar, M. Feng, A. Raza, C. Wang, ... and S. M. Alshamrani (2022) Improving winter wheat photosynthesis, nitrogen use efficiency, and yield by optimizing nitrogen fertilization. *Life* 12:1478, <https://doi.org/10.3390/life12101478>
- Ledesma R. L., E. Solís M., M. P. Suaste F. y M. F. Rodríguez G. (2010) Relación de métodos de labranza, siembra, riego y dosis de nitrógeno con el rendimiento de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1:55-63.
- Ledesma-Ramírez L., E. Solís-Moya, M. P. Suaste-Franco, J. F. Rodríguez-Caracheo y M. L. de la Cruz-González (2012) Análisis GGE biplot del rendimiento de trigo (*Triticum* spp.) con riego normal y restringido en el Bajío, México. *Agrociencia* 46:119-131.
- Martínez D. E. and J. J. Guimét (2004) Distortion of the SPAD 502 chlorophyll meter readings by changes in irradiance and leaf water status. *Agronomie* 24:41-46, <https://doi.org/10.1051/agro:2003060>
- Moreno F. L. P. (2009) Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía Colombiana* 27:179-191.
- Nouri A., A. Etminan, J. A. T. da Silva and R. Mohammadi (2011) Assessment of yield, yield-related traits and drought tolerance of durum wheat genotypes (*Triticum turjidum* var. durum Desf.). *Australian Journal of Crop Science* 5:8-16.
- Paquini-Rodríguez S. L., I. Benítez-Riquelme, H. E. Villaseñor-Mir, A. Muñoz-Orozco y H. Vaquera-Huerta (2016) Incremento en el rendimiento y sus componentes bajo riego normal y restringido de variedades mexicanas de trigo. *Revista Fitotecnia Mexicana* 39:367-378, <https://doi.org/10.35196/rfm.2016.4.367-378>
- Porter J. R. and M. A. Semenov (2005) Crop responses to climatic variation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B - Biological Sciences* 360:2021-2035, <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1752>
- Prasad P. V. V., S. A. Staggenborg and Z. Ristic (2008) Impacts of drought and/or heat stress on physiological, developmental, growth, and yield processes of crop plants. In: Responses of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes. Volume 1. L. R. Ahuja, V. R. Reddy, S. A. Saseendran and Q. Yu (eds.). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. pp:301-355, <https://doi.org/10.2134/advagricsystmodel1.c11>
- Reynolds M. P., M. van Ginkel and J. M. Ribaut (2000) Avenues for genetic modification of radiation use efficiency in wheat. *Journal of Experimental Botany* 51:459-473, [https://doi.org/10.1093/jexbot/51.suppl\\_1.459](https://doi.org/10.1093/jexbot/51.suppl_1.459)
- Richards R. A. (2000) Selectable traits to increase crop photosynthesis and yield of grain crops. *Journal of Experimental Botany* 51:447-458, [https://doi.org/10.1093/jexbot/51.suppl\\_1.447](https://doi.org/10.1093/jexbot/51.suppl_1.447)
- Rosabal A. L., L. Martínez G., Y. Reyes G., J. Dell'Amico R. y M. Núñez V. (2014) Aspectos fisiológicos, bioquímicos y expresión de genes en condiciones de déficit hídrico. Influencia en el proceso de germinación. *Cultivos Tropicales* 35:24-35.
- SAS Institute (2011) SAS/STAT Versión 9.3 User's Guide. SAS Institute Institute, Inc. Cary, North Carolina, USA. 8640 p.
- Semenov M. A., P. Martre and P. D. Jamieson (2009) Quantifying effects of simple wheat traits on yield in water-limited environments

- using a modelling approach. *Agricultural and Forest Meteorology* 149:1095-1104, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.01.006>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023) Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Enero, 2023).
- Statista (2023) Consumo anual per cápita de algunos granos y cereales en México en 2021, por tipo. Statista. Madrid, España. <https://es.statista.com/estadisticas/592154/consumo-aparente-de-los-principales-cultivos-basicos-en-mexico/> (Enero 2023).
- Valverde J. C., D. Arias-Aguilar, E. Montero-Zeledón and D. Gutierrez-Fallas (2021) Fluorescencia, reflectancia y respuesta fisiológica al stress hídrico en plántulas de *Gmelina arborea* Roxb. *Uniciencia* 35:320-334, <https://doi.org/10.15359/ru.35-1.20>
- Wu Q., Y. Zhang, Z. Zhao, M. Xie and D. Hou (2023) Estimation of relative chlorophyll content in Spring wheat based on multi-temporal UAV remote sensing. *Agronomy* 13:211, <https://doi.org/10.3390/agronomy13010211>
- Zhang X., S. Chen, H. Sun, L. Shao and Y. Wang (2011) Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades. *Agricultural Water Management* 98:1097-1104, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.02.003>

