

## Evaluación de índices de sequía en genotipos de trigo cristalino

---

Víctor Adrián Martínez-González<sup>1</sup>  
José Luis Velasco-López<sup>1,§</sup>  
Norma Angélica Ruíz-Torres<sup>1</sup>  
Alejandro Javier Lozano de Río<sup>1</sup>  
Pilar Espitia-Hernández<sup>1</sup>

1 Departamento de Fitomejoramiento-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Saltillo, Coahuila, México. CP. 25315.

Autor para correspondencia: [ljose1924@gmail.com](mailto:ljose1924@gmail.com).

---

### Resumen

El trigo es un cereal importante para la alimentación humana, debido a su aporte proteico y calórico; sin embargo, la producción para el 2050 se verá comprometida por los efectos del cambio climático donde serán cada vez más frecuentes los periodos de sequía que afectarán los cultivos tanto de temporal como de riego. Con base a esta problemática, surge la necesidad de desarrollar cultivos tolerantes al estrés hídrico, por lo cual diversos estudios consideran la estimación de índices de sequía como herramientas para seleccionar genotipos tolerantes al déficit hídrico. El objetivo de este estudio fue evaluar seis índices de sequía en 15 genotipos de trigo cristalino bajo dos láminas de riego en dos localidades de Coahuila y Nuevo León, durante el ciclo agrícola O-I 2023-2024. Los tratamientos que se evaluaron fueron dos láminas de riego para cada localidad, RG1 de 37.27 cm y RG2 de 20.92 cm para Zaragoza, Coahuila y RG1 de 42.24 cm y RG2 de 19.35 cm para Navidad, Nuevo León. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas con dos repeticiones. El índice de tolerancia al estrés hídrico (STI) fue el que mejor se relacionó con el rendimiento de grano en condiciones de déficit hídrico para Zaragoza, Coahuila. El índice de tolerancia (TOL) fue el que mejor se asoció con el rendimiento de grano bajo condiciones de estrés hídrico para Navidad, Nuevo León. Los genotipos 715 y 738 fueron los más tolerantes al estrés hídrico en ambas localidades.

### Palabras clave:

*Triticum durum* L., déficit hídrico, rendimiento, tolerancia.

---



## Introducción

El trigo (*Triticum* spp. L.) es el segundo cereal más cultivado en el mundo, la producción anual se estima en 770 millones de toneladas, de las cuales el 66% se destina para consumo humano (FAO, 2022). El trigo juega un rol importante en la dieta humana, debido a que es fuente de proteínas de origen vegetal y su consumo aporta aproximadamente el 20% de las calorías diarias (Raffo y Jensen, 2023).

En México, la producción de trigo en el ciclo agrícola otoño invierno 2023-2024 fue de 3.47 millones de toneladas, de las cuales 1.87 millones de toneladas corresponden a trigo cristalino y 1.6 millones de toneladas fueron de trigo panificable, estos valores muestran también una reducción anual del 4% en la producción del cultivo (FIRA, 2025). Esta caída en la producción se atribuye principalmente a los prolongados periodos de sequía y a los niveles bajos de almacenamiento de agua en las presas, lo cual afecta a los estados productores de trigo como Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Sinaloa y Sonora, que presentaron en lo que va del año una disminución en la producción de 91%, 56%, 39%, 31% y 21%, respectivamente (FIRA, 2025).

Desafortunadamente se espera que en los próximos años sea más frecuente la escasez de agua para el desarrollo óptimo de los cultivos, tanto en las regiones con sistemas de riego como de temporal (Olivoto *et al.*, 2019). Además de la disponibilidad limitada de agua, las altas temperaturas constituyen otro factor crítico que afecta la productividad del trigo. La sequía y el calor pueden presentarse en distintas etapas del desarrollo del cultivo e impactar procesos morfológicos, fisiológicos y moleculares, provocando pérdidas significativas en el rendimiento (Aberkane *et al.*, 2021).

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S), el año 2024 es considerado como el más cálido de la historia y se espera que la tendencia continúe debido al incremento de la temperatura media anual de 1.55 °C, lo que representa un riesgo para la seguridad alimentaria a futuro (Setter y Waters, 2003; FIRA, 2025). Con base en esta problemática muchos programas de mejoramiento de trigo se están enfocando en el desarrollo de variedades que se adapten a las condiciones climáticas de las regiones productoras de esta gramínea, con el objetivo de incrementar la producción del cereal, además, otros programas de mejoramiento están tratando de adaptar y expandir la producción de este cultivo a nuevas superficies (Raffo y Jensen, 2023).

No obstante, la tolerancia al estrés hídrico es un carácter complejo dado que está controlado por numerosos genes, lo que hace difícil su incorporación en las nuevas variedades (Olivoto *et al.*, 2019). Para facilitar el proceso de selección, diversos autores han propuesto el uso de índices de sequía que permiten identificar genotipos más estables y tolerantes bajo condiciones contrastantes de disponibilidad de agua. Entre los más utilizados se encuentran el índice de susceptibilidad a la sequía (SSI), índice de tolerancia (TOL), índice de productividad media (MP), índice de tolerancia al estrés hídrico (STI), índice de estabilidad de rendimiento (YSI) y el índice de resistencia a la sequía (DI) (Fischer y Maurer, 1978; Rosielle y Hamblin, 1981; Bouslama y Schapaugh, 1984).

En estudios posteriores, se ha demostrado que estos índices son útiles para los programas de mejoramiento genético de plantas, que buscan desarrollar genotipos tolerantes al estrés hídrico (Fernández, 1993; Lan, 1998; Farooq *et al.*, 2009; Mohi-Ud-Din *et al.*, 2022). Recientemente, distintas investigaciones han confirmado la efectividad de los índices de sequía para la identificación de genotipos superiores. Por ejemplo, Aberkane *et al.* (2021) emplearon índices como MP, STI e índice de tolerancia al estrés modificado (MsSTI), en líneas de trigo duro, encontrando que estos se asociaron principalmente con el rendimiento bajo sequía y calor.

De manera similar, Ali y Hamad (2021) evaluaron diez índices de sequía y reportaron que el crecimiento y rendimiento del trigo dependen fuertemente del agotamiento hídrico. En otro estudio, Ayed *et al.* (2017) evaluaron los índices STI, TOL, SSI y MP, determinando que SSI y MP mostraron correlaciones positivas con el rendimiento tanto bajo riego normal como en sequía, por lo que los consideraron más adecuados para la selección de genotipos tolerantes. Más recientemente, Patel *et al.* (2025) demostraron que los índices STI, HARM (media armónica), GMP (Productividad

media geométrica) y MP presentan correlaciones positivas y significativas con el rendimiento en ambientes con y sin estrés, lo que confirma su utilidad para la identificación de líneas de alto rendimiento.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar seis índices de sequía en 15 genotipos de trigo cristalino bajo dos láminas de riego en dos localidades de Coahuila y Nuevo León, con el propósito de seleccionar genotipos tolerantes al estrés hídrico en estas regiones.

## Materiales y métodos

### Localidades

El primer experimento se realizó en el Campo Experimental “Ing. Humberto Treviño Siller” de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) ubicado en Navidad, Galeana, Nuevo León, (24°50' N, 100°12' O; altitud 1 891 m). El segundo se llevó a cabo en la Estación Experimental Unidad Norte de la UAAAN en Zaragoza, Coahuila (28°33' N, 100°55' O; altitud 350 m) (CONAGUA, 2025).

### Material genético

Se evaluaron 15 genotipos de trigo cristalino; de los cuales 14 fueron líneas avanzadas mejoradas que se caracterizan por su calidad y contenido de proteína en grano, que son parte de un vivero internacional de rendimiento de trigo duro (IDYN, por sus siglas en inglés) proporcionado por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). Y como testigo se utilizó la variedad comercial CIRNO C2008, proporcionado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

### Diseño experimental

Los tratamientos se aleatorizaron bajo un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas con dos repeticiones para las dos localidades. Las láminas de riego fueron asignadas a las parcelas grandes y genotipos a las parcelas chicas. Las unidades experimentales fueron conformadas por dos camas de 0.9 m de ancho y 2 m de largo (3.6 m<sup>2</sup>), en ambas localidades.

### Tratamientos de láminas de riego

Los tratamientos de riego consistieron en dos láminas de riego (RG1 y RG2). En ambas localidades se aplicaron tres riegos de establecimiento en las etapas de siembra, emergencia y principio de amacollamiento para uniformizar el cultivo, los cuales se integraron en la lámina total de riego de cada tratamiento. Posteriormente, el riego se aplicó de manera diferenciada por tratamiento.

En la localidad de Zaragoza, a partir del final del amacollamiento y hasta floración, el riego RG1 correspondió a una lámina total de riego de 37.27 cm, con aplicaciones cada 10 días, mientras que RG2 presentó una lámina total de 20.92 cm, con aplicaciones cada 24 días, con el fin de inducir estrés hídrico durante etapas fenológicas críticas del cultivo. En la localidad de Navidad, desde el final del amacollamiento y hasta llenado de grano, las láminas totales fueron de 42.24 cm (RG1, aplicaciones cada 11 días) y de 19.35 cm (RG2, aplicaciones cada 20 días).

En total, se aplicaron 10 y 11 riegos en RG1 para Zaragoza y Navidad, respectivamente, y cinco riegos en RG2 en ambas localidades. En el tratamiento RG1 se aplicaron menos riegos en Zaragoza que en Navidad, debido a que en esta última localidad el ciclo fue más largo por las condiciones climáticas. El riego se aplicó mediante un sistema de riego por goteo, con cintilla instalada a lo largo de los surcos en un tipo de suelo franco en ambas localidades. La respuesta de los genotipos al estrés hídrico se evaluó de manera indirecta mediante el rendimiento de grano y la estimación de índices de sequía.

## Manejo agronómico

Los experimentos se establecieron durante el ciclo otoño-invierno 2023-2024 (O-I 2023-24). En la primera localidad (Zaragoza, Coahuila) la siembra se realizó el 21 de diciembre de 2023, y para la segunda localidad (Navidad, Nuevo León) el 17 de enero de 2024, con base a lo recomendado por Ramírez-Pérez *et al.* (2021), con el propósito de reducir el riesgo de heladas durante la etapa de floración del cultivo en ambas localidades.

La siembra se realizó de manera manual y se empleó una densidad de 80 kg ha<sup>-1</sup>, según lo recomendado por Noriega-Carmona *et al.* (2019), para las siembras de trigos en surcos. La fertilización del cultivo se realizó con una dosis total de 260-100-00 (unidades de nitrógeno-unidades de fósforo). Se utilizó urea como fuente de nitrógeno (N) y fosfato monoamónico como fuente de fósforo (P), las cantidades de fertilizantes aplicadas fueron de 520 kg y 192 kg, respectivamente. Los fertilizantes se aplicaron en tres etapas, es decir, en la siembra el 40% de N y el 100% de P, la segunda aplicación (40% de N) fue en la etapa fenológica de amacollamiento (Zadoks 20) y la última fertilización en la etapa de espigamiento (Zadoks 50) con 20% de N.

## Variables evaluadas

Rendimiento de grano (kg ha<sup>-1</sup>): cuando los genotipos alcanzaron la etapa de cosecha (Zadoks 99), se cortaron las espigas de una cama de cada parcela (1.8 m<sup>2</sup>), posteriormente se trillaron con una cosechadora estacionaria tipo Pullman. El material cosechado se limpió, se midió el contenido de humedad en % con un medidor de humedad para granos portátil Agratronix® Mt-pro 08125, y se determinó su peso en gramos con una balanza analítica. Con estos datos se procedió a calcular el rendimiento de grano ajustado al 12% de humedad (CIMMYT, 2012).

Previo a la cosecha, se verificó la uniformidad del establecimiento y no se observaron fallas significativas en el área cosechada. Con base en los valores de rendimiento de grano obtenidos bajo condiciones óptimas y de estrés hídrico, se estimaron seis índices de sequía para evaluar la respuesta de los genotipos. A continuación, se describen los índices y sus respectivas expresiones matemáticas.

Índice de susceptibilidad a la sequía (SSI): cuantifica la reducción relativa del rendimiento de un genotipo bajo sequía en comparación con las condiciones óptimas (Fischer y Maurer, 1978).

$$SSI = \frac{1 - \left(\frac{Y_s}{Y_p}\right)}{1 - \left(\frac{\bar{Y}_s}{\bar{Y}_p}\right)}$$

Índice de tolerancia (TOL): Representa la diferencia absoluta de rendimiento entre condiciones óptimas y de estrés hídrico (Rosielle y Hamblin, 1981).

$$TOL = Y_p - Y_s$$

Índice de productividad media (MP): Expresa el rendimiento promedio de un genotipo bajo condiciones de estrés hídrico y óptimas, sin considerar la magnitud de la reducción causada por la sequía (Rosielle y Hamblin, 1981).

$$MP = \frac{Y_p + Y_s}{2}$$

Índice de tolerancia a estrés hídrico (STI): Permite identificar genotipos con alto rendimiento tanto en condiciones óptimas como de estrés hídrico, reflejando un equilibrio entre el rendimiento y la tolerancia a la sequía (Fernández, 1993).

$$STI = \frac{Y_p \times Y_s}{(\bar{Y}_p)^2}$$

Índice de estabilidad de rendimiento (YSI): Evalúa la estabilidad relativa del rendimiento de un genotipo bajo condiciones de estrés hídrico en comparación con condiciones óptimas (Bousslama y Schapaugh, 1984).

$$YSI = \frac{Y_s}{\bar{Y}_p}$$

Índice de resistencia a la sequía (DI): Permite identificar genotipos con rendimiento superior al promedio bajo condiciones de estrés hídrico (Lan, 1998).

$$DI = \frac{Y_s}{\bar{Y}_s}$$

Donde:  $Y_p$  = es el rendimiento en condiciones óptimas,  $Y_s$  = el rendimiento bajo estrés hídrico o condiciones de sequía,  $\bar{Y}_s$  = es el rendimiento promedio en condiciones de sequía,  $\bar{Y}_p$  = rendimiento promedio en condiciones óptimas.

### Análisis estadísticos

Se realizaron regresiones lineales simples entre cada índice de sequía y el rendimiento de grano por cada localidad. Los análisis de los datos se llevaron a cabo utilizando los programas estadísticos SAS 9.0 (2013) y RStudio (2024).

## Resultados y discusión

### Identificación de genotipos con tolerancia al estrés hídrico

Los valores de rendimiento de grano bajo condiciones óptimas y de restricción hídrica, así como los índices de sequía estimados para las líneas de trigo cristalino evaluadas en ambas localidades, se presentan en el Cuadro 1. El índice TOL identificó al genotipo 738 (-996.73) para la localidad de Navidad y al genotipo 715 (399.61) para la localidad de Zaragoza como los más tolerantes al estrés hídrico. De acuerdo con Fischer y Maurer (1978), los valores menores indican mayor eficiencia fisiológica en el uso del agua, lo que podría estar relacionado con una regulación estomática eficiente y un mantenimiento estable del llenado de grano.

**Cuadro 1. Valores de rendimiento de grano e índices de sequía en líneas de trigo cristalino bajo dos niveles de riego en dos localidades.**

Líneas	Navidad							Zaragoza								
	RG1(Yp)	RG2(Ys)	TOL	MP	YSI	SSI	STI	DI	RG1(Yp)	RG2(Ys)	TOL	MP	YSI	SSI	STI	DI
	(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )							(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )						
CIR	2095.46	1207.23	888.23	1651.35	0.58	1.28	1.22	0.42	2411.73	1731.09	680.64	2071.41	0.72	0.86	0.85	0.28
705	2022.8	669.69	1353.11	1346.24	0.33	2.03	0.65	0.67	2030	1334.53	695.47	1682.27	0.66	1.05	0.55	0.34
706	1714.33	1296.6	417.74	1505.46	0.76	0.74	1.07	0.24	2289.3	1605.36	683.94	1947.33	0.7	0.91	0.75	0.3
711	1814.66	819.04	995.63	1316.85	0.45	1.66	0.72	0.55	2367.18	1933.76	433.42	2150.47	0.82	0.56	0.93	0.18
713	1373.4	718.86	654.54	1046.13	0.52	1.44	0.48	0.48	2091.72	1515.76	575.96	1803.74	0.72	0.84	0.64	0.28
715	1139.2	1220.09	-80.89	1179.64	1.07	-0.22	0.67	-0.07	2327.5	1927.9	399.61	2127.7	0.83	0.52	0.91	0.17
716	1267.55	1078.15	189.4	1172.85	0.85	0.45	0.66	0.15	2177.5	1061.44	1116.06	1619.47	0.49	1.57	0.47	0.51
728	1135.44	800.63	334.81	968.04	0.71	0.89	0.44	0.29	1661.55	1145.42	516.14	1403.48	0.69	0.95	0.39	0.31
736	1068.93	966.41	102.52	1017.67	0.9	0.29	0.5	0.1	2053.61	1527.93	525.68	1790.77	0.74	0.78	0.64	0.26
738	375.58	1372.31	-996.73	873.94	3.65	-8.04	0.25	-2.65	2577.48	1766.43	811.05	2171.96	0.69	0.96	0.92	0.31
739	1210.21	812.85	397.37	1011.53	0.67	0.99	0.48	0.33	2439.89	1027.31	1412.58	1733.6	0.42	1.77	0.51	0.58

Líneas	Navidad								Zaragoza							
	RG1(Yp) (kg ha <sup>-1</sup> )	RG2(Ys) (kg ha <sup>-1</sup> )	TOL	MP	YSI	SSI	STI	DI	RG1(Yp) (kg ha <sup>-1</sup> )	RG2(Ys) (kg ha <sup>-1</sup> )	TOL	MP	YSI	SSI	STI	DI
740	1089.16	874.8	214.36	981.98	0.8	0.6	0.46	0.2	2340.85	1729.02	611.83	2034.93	0.74	0.8	0.82	0.26
745	1570.48	664.72	905.76	1117.6	0.42	1.75	0.5	0.58	1937.28	1386.48	550.8	1661.88	0.72	0.87	0.54	0.28
748	1961.83	1013.88	947.95	1487.85	0.52	1.46	0.96	0.48	2448.66	1475.62	973.04	1962.14	0.60	1.21	0.73	0.4
749	1741.99	939.16	802.83	1340.57	0.54	1.4	0.79	0.46	2148.35	1235.05	913.3	1691.70	0.57	1.3	0.54	0.43
Media	1438.73	963.63							2220.17	1493.54						

RG1(Yp)= rendimiento de grano en condiciones óptimas; RG2(Ys)= rendimiento de grano en condiciones de sequía; TOL= índice de tolerancia; MP= índice de productividad media; YSI= índice de estabilidad del rendimiento; SSI= índice de susceptibilidad a la sequía; STI= índice de tolerancia al estrés hídrico; DI= índice de resistencia a la sequía.

El índice MP identificó a CIR (1651.35) para la localidad de Navidad y el genotipo 738 (2171.96) para Zaragoza, como los más productivos bajo condiciones contrastantes de láminas de riego (Cuadro 1), lo cual concuerda con Rosielle y Hamblin (1981), quienes, relacionan valores altos de MP con mayor área fotosintética activa y eficiencia en la partición de la biomasa hacia órganos reproductivos.

El índice YSI identificó al genotipo 738 (3.65) para Navidad y al genotipo 715 (0.83) para Zaragoza como los genotipos de mayor estabilidad relativa de rendimiento bajo condiciones de déficit hídrico (Cuadro 1), estos valores sugieren que los genotipos presentan mayor tolerancia a la sequía. Ciertos estudios han señalado que este comportamiento puede estar asociado posiblemente por la presencia de mecanismos adaptativos como menor transpiración, cutículas más gruesas o sistemas radicales profundos, que son considerados claves para la tolerancia a sequía (Blum, 2011); sin embargo, la identificación de dichos mecanismos no fue objeto del presente estudio.

El Índice SSI mostró al genotipo 738 para Navidad y al genotipo 715 para Zaragoza, como los genotipos menos afectados al déficit hídrico, lo cual puede estar relacionado con reportes previos que asocian una menor susceptibilidad al estrés hídrico con la eficiencia en procesos fisiológicos como el ajuste osmótico y a la mayor acumulación de osmoprotectores (Mohammadi y Prasanna, 2003), los cuales no fueron evaluados directamente en esta investigación.

El índice STI identificó al genotipo CIR (1.22) para Navidad y al genotipo 711 (0.93) para Zaragoza, como los más tolerantes al estrés hídrico (Cuadro 1). Lo que sugiere que, de acuerdo con Fernández (1993), que un STI elevado indica que los genotipos tienen la capacidad de mantener su productividad bajo condiciones variables de agua para riego.

El índice DI mostró al genotipo 705 (0.67) para la localidad de Navidad y el genotipo 739 (0.58) como los genotipos más resistentes a la sequía (Cuadro 1). Es posible que estas respuestas se encuentren relacionadas con un mayor desarrollo de biomasa radicular y una sincronización fenológica favorable respecto a la disponibilidad de agua en el suelo (Blum, 2011); no obstante, estas variables no fueron evaluadas y deberían ser consideradas en investigaciones posteriores.

## Validación de índices de sequía para la selección de genotipos

Los análisis de regresión para la localidad de Navidad mostraron relación positiva significativa entre el índice TOL y el rendimiento de grano bajo déficit hídrico con  $R^2 = 0.38$  (Cuadro 2). De manera similar YSI, SSI y DI con  $R^2 = 0.37$ . Los valores obtenidos en el coeficiente de determinación sugieren que estos índices son los más útiles para identificar a los genotipos con tolerancia a la sequía.



**Cuadro 2. Análisis de varianza y parámetros de regresión lineal simple de índices de sequía asociados al rendimiento de grano bajo déficit hídrico en Navidad, NL.**

FV	STI	YSI	TOL	MP	SSI	DI
REND	84966	275419	279802	38272	274139	275419
RESIDUAL	49849	35199	34862	53441	35298	35199
<i>p</i> -value	0.21	0.015*	0.014*	0.41	0.015*	0.015*
# <sub>0</sub>	768.7	814.33	1081.39	690.95	989.47	989.7
# <sub>1</sub>	296.8	175.37	-0.24	0.22	-57.68	-175.37
R <sup>2</sup>	0.11	0.37	0.38	0.05	0.37	0.37

FV= fuente de variación; STI= índice de tolerancia al estrés; YSI= índice de estabilidad del rendimiento; TOL= índice de tolerancia; MP= índice de productividad media; SSI= índice de susceptibilidad a la sequía; DI= índice de resistencia a la sequía; β<sub>0</sub>= intercepto; β<sub>1</sub>= pendiente de la regresión; R<sup>2</sup>= coeficiente de determinación; \*= significativo (*p* ≤ 0.05).

Cabe resaltar que estos índices que describen la pérdida absoluta, estabilidad relativa, susceptibilidad y resistencia relativa brindan más información sobre el comportamiento del cultivo bajo condiciones de estrés, en comparación con los índices que se basan solamente en el promedio de rendimiento. Por el contrario, el índice STI no es muy útil para seleccionar genotipos tolerantes a la sequía en ambientes donde hay mucha variación experimental a causa de las condiciones agroclimáticas y edafológicas en las que se desarrolla el cultivo (Bhandari *et al.*, 2024; Golabadi *et al.*, 2006).

Por su parte, el índice MP tampoco es indicador, debido a que sobrestima genotipos que rinden bien en condiciones óptimas, pero no bajo estrés hídrico (Rosielle y Hamblin, 1981).

Los análisis de regresión para la localidad de Zaragoza mostraron relación positiva significativa entre los índices STI (Cuadro 3) y MP con el rendimiento de grano con R<sup>2</sup> = 0.89 y 0.79, respectivamente. Los valores obtenidos en los coeficientes de determinación indican una mayor varianza por efecto de los genotipos y menor variación residual en esta localidad (Bänzinger *et al.*, 2000; Blum, 2011).

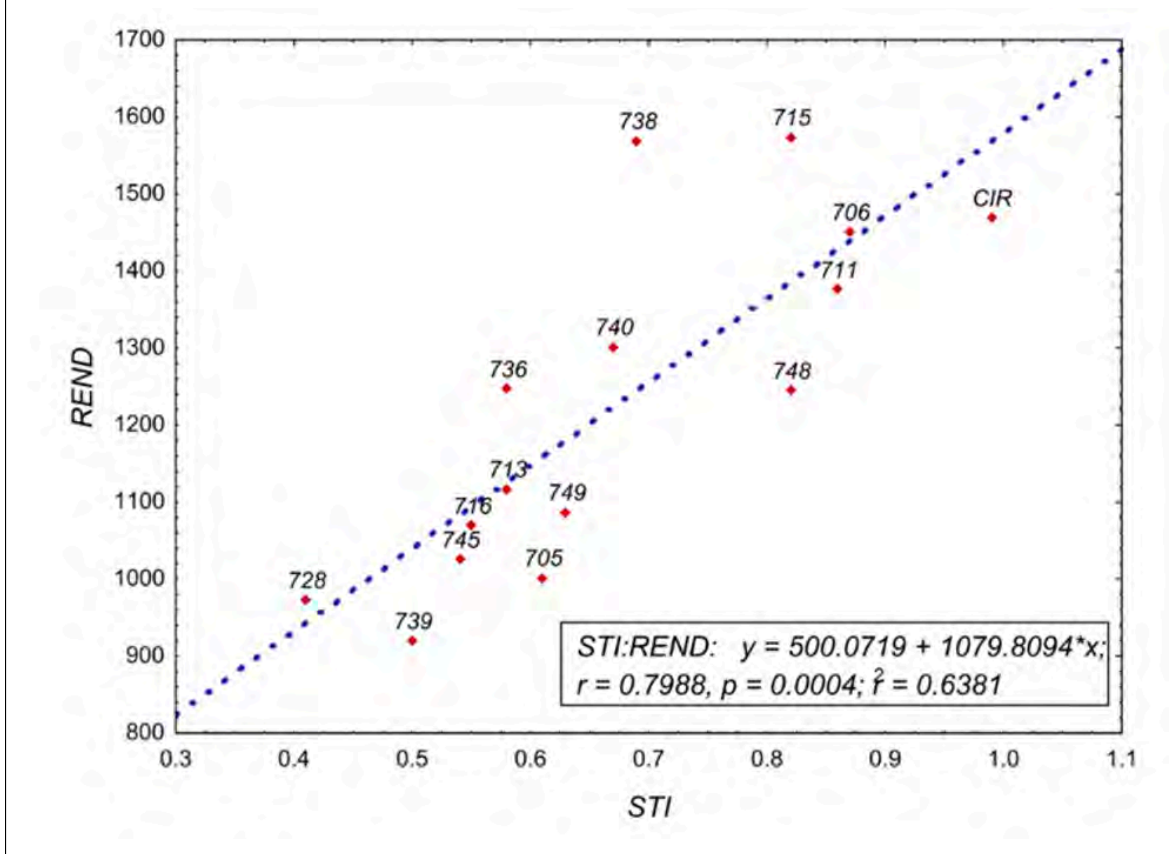
**Cuadro 3. Análisis de varianza y parámetros de regresión lineal simple de índices de sequía asociados al rendimiento de grano bajo déficit hídrico en Zaragoza, Coahuila.**

FV	STI	YSI	TOL	MP	SSI	DI
REND	1088710	847021	516378	958246	845487	847021
RESID	9495	28086	53521	19531	28204	28086
<i>p</i> -value	8e-08**	1e-04**	8e-03**	9.27e-06**	1e-04**	1e-04**
# <sub>0</sub>	431.3	18.12	1997.34	-625.3	2209	2210.2
# <sub>1</sub>	1563.6	2189	-0.69	1.14	-717.8	-2196.3
R <sup>2</sup>	0.89	0.7	0.42	0.79	0.69	0.69

FV= fuente de variación; STI= índice de tolerancia al estrés; YSI= índice de estabilidad del rendimiento; TOL= índice de tolerancia; MP= índice de productividad media; SSI= índice de susceptibilidad a la sequía; DI= índice de resistencia a la sequía; β<sub>0</sub>= intercepto; β<sub>1</sub>= pendiente de la regresión; R<sup>2</sup>= coeficiente de determinación; \*\*= significativo (*p* ≤ 0.01).

En este caso el índice STI permitió identificar materiales productivos bajo condiciones de déficit hídrico, mientras que el índice MP identificó a los genotipos productivos bajo condiciones óptimas y con déficit hídrico (Fernández, 1993; Mohammadi *et al.*, 2017). Los análisis de regresión realizados mostraron relación positiva y significativa entre los índices STI y YSI con el promedio del rendimiento de grano de ambas localidades (Figura 1). El coeficiente de determinación que se obtuvo para tal regresión fue de R<sup>2</sup> = 0.64 y 0.57, respectivamente.

Figura 1. Relación entre el índice de sequía STI y el rendimiento de grano con déficit hídrico en promedio de las localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.



En investigaciones agrícolas los índices STI y YSI son los más empleados, ya que permiten la selección de genotipos tanto bajo condiciones óptimas como de estrés. Estudios recientes en trigo han demostrado que diversos índices incluyendo SSI, STI y MP suelen asociarse positivamente con el rendimiento, por lo que resultan eficaces para identificar líneas de alto rendimiento tanto en condiciones de estrés por sequía como en condiciones óptimas (Patel *et al.*, 2025; Patel *et al.*, 2019; Ayed *et al.*, 2017).

## Conclusiones

El índice STI mostró la mayor asociación con el rendimiento de grano bajo condiciones de déficit hídrico en Zaragoza, Coahuila, mientras que el índice TOL presentó la mayor asociación en la localidad de Navidad, Nuevo León.

Con base en la estimación de los índices de sequía en ambas localidades, los genotipos 715 y 738 mostraron un mejor desempeño relativo bajo condiciones de restricción hídrica. Estos resultados son de carácter preliminar y sugieren que dichos genotipos podrían considerarse para evaluaciones posteriores en ambientes con disponibilidad limitada de agua, sin comprometer el rendimiento de grano.



## Bibliografía

- 1 Aberkane, H.; Belkadi, B.; Kehel, Z.; Filali-Maltouf, A.; Tahir, I. S.; Meheesi, S. and Amri, A. 2021. Assessment of drought and heat tolerance of durum wheat lines derived from interspecific crosses using physiological parameters and stress indices. *Agronomy*. 11(695):1-20. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040695>.
- 2 Ali, K. A. and Hamad, H. H. 2021. Application of some drought stress indices to study response of durum wheat *Triticum durum* to different levels of water depletion. *Tikrit Journal for Agricultural Sciences*. 21(1):48-58. <https://doi.org/10.25130/tjas.21.1.5>.
- 3 Ayed, S.; Rezgui, M.; Othmani, A.; Rezgui, M.; Trad, H.; Teixeira-Silva, J. A. and Kharrat, M. 2017. Respuesta al estrés hídrico de trigos duros (*Triticum turgidum* ssp. durum) y harineros (*Triticum aestivum* L.) de Túnez. *Agrociencia*. 51(1):13-26. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1275/1275>.
- 4 Bänzinger, M.; Edmeades, G. O.; Beck, D. and Bellon, M. 2000. Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize: from theory to practice. International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT). México. 68 p.
- 5 Bhandari, R.; Paudel, H.; Alharbi, S. A.; Ansari, M. J.; Poudel, M. R.; Neupane, M. P.; Solanki, P. and Singh, U. K. 2024. Evaluating stress tolerance indices for their comparative validity to access terminal heat stress and heat drought tolerance of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *Journal of Agriculture and Food Research*. 18(101506):1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101506>.
- 6 Blum, A. 2011. Plant breeding for water-limited environments. Springer Science & Business Media (Springer New York). USA. 249 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7491-4>.
- 7 Bouslama, M. and Schapaugh, W. T. 1984. Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Science*. 24(5):933-937. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x>.
- 8 CIMMYT. 2012. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. Manual de determinación de rendimiento. México. DF. 27 p. <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/18249/48867.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- 9 CONAGUA. 2025. Servicio Meteorológico Nacional. Plataforma de Información Climática (PIC). Serie mensual, estaciones Galeana y Allende. México. <https://smn.conagua.gob.mx>.
- 10 Farooq, M.; Wahid, A.; Kobayashi, N.; Fujita, D. and Basra, S. M. A. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for sustainable development*. 29(1):185-212. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8-12>.
- 11 Fernández, G. C. 1993. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: Kuo, C. G. Ed. Adaptation of food crops to temperature and water stress: proceedings of an international symposium, Taiwan. Asian Vegetable Research and Development Center. Taiwán. 257-270 pp. <https://worldveg.tind.io/record/18578?ln=en>.
- 12 FIRA. 2025. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. Perspectivas 2025. México. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. México. 99 p. <https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=125713>.
- 13 Fischer, R. A. and Maurer, R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*. 29(5):897-912. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>.
- 14 FAO. 2022. Food and Agriculture Organization of the United Nations) and International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). The Global Agro-Ecological Zoning Version 4 Crop profile: Wheat. Italia. 15 p. <chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcjgclclefindmkaj/https://s3.euwest1.amazonaws.com/data.gaezdev.aws.fao.org/crop-profiles/GAEZ-Crop-profile-wheat.pdf>.

- 15 Golabadi, M.; Arzani, A. and Maibody, S. A. 2006. Assessment of drought tolerance in segregating populations in durum wheat. *African Journal of Agricultural Research*. 1(5):162-171. <http://www.academicjournals.org/AJAR>.
- 16 Lan, T. H. 1998. Drought resistance evaluation in wheat genotypes. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 180(3):155-163.
- 17 Mohammadi, R. and Abdulahi, A. 2017. Evaluation of durum wheat genotypes based on drought tolerance indices under different levels of drought stress. *Journal of Agricultural Sciences, Belgrade*. 62(1):1-14. <https://doi.org/10.2298/JAS1701001M>.
- 18 Mohammadi, S. A. and Prasanna, B. M. 2003. Analysis of genetic diversity in crop plants salient statistical tools and considerations. *Crop Science*. 43(4):1235-1248. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1235>.
- 19 Mohi-Ud-Din, M.; Hossain, M. A.; Rohman, M. M.; Uddin, M. N.; Haque, M. S.; Ahmed, J. U. and Pessarakli, M. 2022. Canopy spectral reflectance indices correlate with yield traits variability in bread wheat genotypes under drought stress. *PeerJ*. 10(14421):1-33. <https://doi.org/10.7717/peerj.14421>.
- 20 Noriega-Carmona, M. A.; Cervantes-Ortiz, F.; Solís-Moya, E.; Andrio-Enríquez, E.; Rangel-Lucio, J. A.; Rodríguez-Pérez, G. y García-Rodríguez, J. G. 2019. Efecto de la fecha de siembra sobre la calidad de semilla de trigo en el Bajío, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 42(4):375-384. <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sciarttext&pid=S018773802019000400375&lng=es&tlng=es>.
- 21 Olivoto, T.; Lúcio, A. D.; Silva, J. A.; Marchioro, V. S.; Souza, V. Q. and Jost, E. 2019. Mean performance and stability in multi-environment trials I: combining features of AMMI and BLUP techniques. *Agronomy Journal*. 111(6):2949-2960. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0220>.
- 22 Patel, J. M.; Patel, C. R.; Patel, S. K.; Patel, A. S.; and Patel, Y. N. 2025. Assessment of durum wheat genotypes by drought tolerance indices under drought and normal condition. *Agricultural Science Digest*. 1-8 pp. <https://doi.org/10.18805/ag.D-6275>.
- 23 Patel, J. M.; Patel, A. S.; Patel, C. R.; Mamrutha, H. M.; Pradeep, S. and Pachchigar, K. P. 2019. Evaluation of selection indices in screening durum wheat genotypes combining drought tolerance and high yield potential. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 8(4):1165-1178. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.804.134>.
- 24 Raffo, M. A. and Jensen, J. 2023. Gene  $\times$  gene and genotype  $\times$  environment interactions in wheat. *Crop Science*. 63(4):1779-1793. <https://doi.org/10.1002/csc2.20986>.
- 25 Ramírez-Pérez, L. O.; Zamora-Villa, V. M.; Colín-Rico, M. y De León-Castillo, H. 2021. Interacción genotipo-ambiente en fracciones de forraje de trigos en tres muestreos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 12(3):485-498.
- 26 Rosielle, A. A. and Hamblin, J. 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment. *Crop Science*. 21(6):943-946. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x>.
- 27 RStudio Posit Software, PBC. 2024. (Version 2024.09.1+394) [Integrated Development Environment for R]. United States of America. <https://posit.com/>.
- 28 SAS Institute Inc. 2013. Versión 9.2. Cary, NC, United States of America. SAS.
- 29 Setter, T. L. and Waters, I. 2003. Review of prospects for germplasm improvement for waterlogging tolerance in wheat, barley and oats. *Plant and Soil*. 253(1):1-34.
- 30 Zadoks, J. C.; Chang, T. T. and Konzak, C. F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res*. 14(6):415-421.

## Evaluación de índices de sequía en genotipos de trigo cristalino

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
ISSN (electronic): 2007-9934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 January 2026
Date accepted: 01 March 2026
Publication date: 01 May 2026
Publication date: May-Jun 2026
Volume: 17
Issue: 3
Electronic Location Identifier: e4072
DOI: 10.29312/remexca.v17i3.4072

### Categories

Subject: Artículo

### Palabras clave:

**Palabras clave:**

déficit hídrico  
rendimiento  
tolerancia  
*Triticum durum* L.

### Counts

Figures: 1  
Tables: 3  
Equations: 6  
References: 30