

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Evaluación de Estrategias Agronómicas y su Efecto sobre la Incidencia de Panza
Blanca, la Calidad Física y el Rendimiento del Grano en Trigo Cristalino
(*Triticum durum* L.)

Por:

HOMERO DURÁN FLORES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO FITOTECNISTA

Saltillo, Coahuila, México

Marzo, 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Evaluación de Estrategias Agronómicas y su Efecto sobre la Incidencia de Panza
Blanca, la Calidad Física y el Rendimiento del Grano en Trigo Cristalino
(*Triticum durum* L.)

Por:

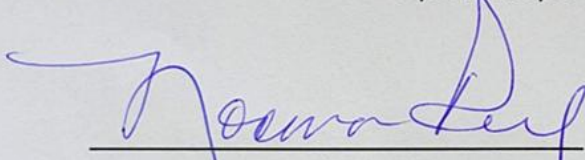
HOMERO DURÁN FLORES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO FITOTECNISTA

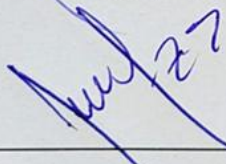
Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dra. Norma Angelica Ruiz Torres
Asesor Principal



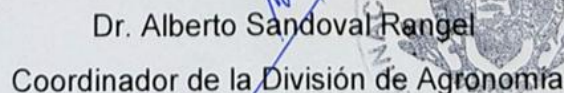
Dra. Pilar Espitia Hernández
Asesor Principal Externo



Dr. José Luis Velasco López
Coasesor



Lic. Úrsula Elva Casar Belmares
Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México
Marzo, 2026

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Por medio de la presente, yo, Homero Durán Flores, declaro bajo protesta de decir verdad que la tesis titulada: "Evaluación de estrategias agronómicas y su efecto sobre la incidencia de panza blanca, la calidad física y el rendimiento del grano en trigo cristalino (*Triticum durum* L.)" es resultado de mi trabajo original de investigación.

Afirmo que no he copiado ni reproducido, total ni parcialmente, trabajos o publicaciones de otros autores sin la debida cita y reconocimiento de las fuentes correspondientes.

Asumo la total responsabilidad por el contenido de este trabajo, así como por las consecuencias que pudieran derivarse en caso de detectarse algún tipo de plagio.

Atentamente,



Homero Durán Flores

DEDICATORIA

A mi familia por ser mi pilar inquebrantable, a mi esposa Ana Carolina Saucedo por su amor y comprensión y ánimo, en los momentos más desafiantes.

A mis hijos Mayra Carolina, Homero y Ricardo.

A mis nietas Emma Carolina y Renata, que son mi mayor fuente de inspiración.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mi escuela la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro que fue indispensable para la realización de este trabajo.

A la Dra. Norma Ruiz Torres que me inspiró y apoyó en cada paso del camino. Sus palabras de aliento y compañía hicieron que esta experiencia fuera más enriquecedora.

También quiero agradecer a mi asesora la Dra. Pilar Espitia Hernández, por su guía, paciencia y apoyo constante, durante todo el desarrollo del trabajo de investigación.

A el Dr. José Luis Velazco López por su experiencia y disposición para compartir sus conocimientos que fueron fundamentales en este proceso.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ÍNDICE DE CUADROS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
RESUMEN.....	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general.....	3
1.1.1. Objetivos específicos.....	3
1.2. Hipótesis	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Importancia económica y productiva del trigo cristalino en México.....	4
2.2. Calidad física de la semilla de trigo.....	5
2.3. Coloración del grano	6
2.4. Panza blanca en trigo cristalino	6
2.5. La fertilización nitrogenada en el rendimiento e incidencia de panza blanca en el grano de trigo	7
3. MATERIALES Y MÉTODOS	8
3.1. Material genético	8
3.2. Ubicación del experimento	8
3.3. Establecimiento de experimentos en campo.....	9
3.4. Aplicación de fertilización y riego.....	9
3.5. Cosecha, trilla y limpieza de las semillas de trigo de las localidades	10
3.6. Variables de respuesta.....	11
3.6.1. Determinación de rendimiento de grano	11
3.6.2. Evaluación de la coloración de los granos	12
3.6.3. Estimación del porcentaje de panza blanca	12
3.6.4. Determinación del peso de mil semillas	12
3.6.5. Estimación del peso hectolítrico.....	13
3.7. Análisis estadístico.....	13
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14

4.1. Rendimiento de grano	14
4.2 Calidad física del grano	17
4.2.1. Coloración del grano.....	17
4.2.2. Análisis de varianza para el contenido de panza blanca, peso de mil semillas y peso hectolítrico.....	22
4.2.3. Análisis de comparación de medias para panza blanca	25
4.2.4. Panza blanca: influencia de la localidad, riego, fertilización y genotipo ...	27
4.2.5. Análisis de comparación de medias para peso de mil semillas y peso hectolítrico	31
4.3. Análisis de correlación	33
5. CONCLUSIONES	35
REFERENCIAS	36

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Porcentaje de fertilizante nitrogenado aplicado en distintas etapas fenológicas del cultivo de trigo, de acuerdo con la localidad y nivel de fertilización.	9
Cuadro 2. Calendario de aplicación de riegos de auxilio por etapa fenológica en dos localidades.	10
Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables rendimiento y coloración de grano de tres genotipos de trigo cristalino.....	19
Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de calidad física del grano de trigo.	24
Cuadro 5. Efecto de la interacción de la localidad, riego, fertilización y genotipo sobre los valores medios del contenido de panza blanca (PB) en trigo cristalino.	29
Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de rendimiento y calidad física del grano de trigo cristalino.....	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de la localidad, riego y fertilización sobre los valores medios del rendimiento de grano de trigo (t ha^{-1}).....	15
Figura 2. Efecto de las interacciones entre localidad x riego y localidad x fertilización sobre los valores medios del rendimiento de grano de trigo (t ha^{-1}).	17
Figura 3. Valores medios de los componentes de coloración en tres genotipos de trigo cristalino.	20
Figura 4. Efecto de las interacciones entre localidad x riego sobre los valores medios del rendimiento de los componentes de coloración de granos de trigo cristalino..	21
Figura 5. Efecto de la localidad, riego, fertilización (A) y genotipo (B) sobre los valores medios del contenido de panza blanca (PB) en trigo cristalino.....	27
Figura 6. Efecto del riego, la fertilización (A) y el genotipo (B) sobre los valores medios del peso mil de semillas en trigo cristalino.....	32
Figura 7. Efecto del riego, la fertilización (A) y el genotipo (B) sobre los valores medios del peso hectolítrico en trigo cristalino.	32

RESUMEN

El trigo cristalino (*Triticum durum* L.) es un cultivo de gran importancia económica y alimentaria a nivel mundial. En México, su producción se ve afectada por condiciones de escasez hídrica y altos costos de fertilizantes nitrogenados, lo cual influye negativamente en la calidad del grano, particularmente por la aparición del trastorno fisiológico conocido como panza blanca. Este defecto, asociado a deficiencias de nitrógeno, reduce el valor comercial del grano al afectar sus propiedades físicas, esenciales para la industria procesadora de pasta. El objetivo de esta investigación fue: evaluar el efecto de diferentes niveles de riego y fertilización nitrogenada sobre la incidencia de panza blanca, así como en el rendimiento y la calidad física de genotipos de trigo cristalino (*Triticum durum* L.) bajo condiciones de campo. Se establecieron ensayos en dos localidades: Zaragoza, Coahuila y Navidad municipio de Galeana, Nuevo León, utilizando un diseño de bloques completos al azar con arreglo de parcelas subdivididas y dos repeticiones, con tres niveles de riego, tres niveles de fertilización y tres genotipos. Los genotipos correspondieron a dos líneas avanzadas de trigo cristalino provenientes del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y la variedad Cirno utilizada como testigo.

Las variables de respuesta evaluadas fueron: rendimiento de grano, coloración del grano, peso de mil semillas (PMS), peso hectolítrico (PHL) e incidencia de panza blanca (PB). Para el análisis de los resultados se llevaron a cabo análisis de varianza ($p \leq 0.01$ y $p \leq 0.05$) y comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$), utilizando el software estadístico InfoStat (versión 5.13). Además, se efectuaron análisis de correlación de Pearson para determinar el grado de asociación entre las variables.

Los resultados mostraron que el rendimiento de grano estuvo influenciado significativamente por la localidad, el riego y la fertilización, con los mejores resultados en Zaragoza Coah., bajo riego alto (4.0 t ha^{-1}). En la coloración de grano se observaron diversos efectos significativos tanto principales como las

interacciones de los factores evaluados, donde el genotipo 748 destacó en los tres valores Luminosidad (L) 61, valor +a rojo (a) 11.34 y valor +b amarillo (b) 23.92. La incidencia de PB mostró efectos significativos de todos los factores y sus interacciones. La mayor incidencia de PB (16.77%) se observó en Navidad, N.L., con riego alto y baja fertilización en el genotipo 748. Además, con riego alto se obtuvieron los valores más altos de PMS (44.5 g) y PHL (76.89 kg hl⁻¹). El genotipo 706 presentó los valores más altos de PMS y PHL, mientras que el genotipo 748 mostró los más bajos.

Por otro lado, los resultados revelaron correlaciones positivas significativas entre: PB y PHL ($r = 0.72$), PB y el valor a ($r = 0.98$), valor L y el valor a ($r = 0.96$), PMS y PHL ($r = 0.65$), PHL y el valor b ($r = 0.61$); así como también correlaciones negativas significativas de PMS con los valores L ($r = -0.61$) y a ($r = -0.66$).

Esta investigación realizada en las localidades de Zaragoza, Coah. y Navidad, N.L. proporciona información valiosa sobre la influencia de factores agronómicos importantes como son el riego y la fertilización en el rendimiento y la calidad física del grano de trigo cristalino, especialmente en la incidencia de PB, parámetro de gran importancia en la industria de pastas. Los resultados destacan la necesidad de seleccionar genotipos y optimizar las prácticas agronómicas ante la escasez de recursos, lo que puede contribuir a mejorar la producción de trigo cristalino en el Norte de México.

1. INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum aestivum* L.) representa un alimento esencial en la nutrición del 36% de la población mundial y se cultiva en el 70% de las zonas agrícolas. En términos de consumo, el trigo contribuye con aproximadamente el 55% de los carbohidratos y el 21% de las calorías ingeridas a nivel mundial, superando en producción y extensión de cultivo a otros granos como el arroz y el maíz. Su capacidad de adaptación a diversas condiciones climáticas lo convierte en el cultivo de cereales más relevante a nivel internacional (Khalid *et al.*, 2023).

En cuanto a su clasificación, el trigo cristalino o duro (*Triticum durum* L.) ocupa el segundo lugar en importancia entre los trigos cultivados. Durante la primera década del siglo XXI, su consumo creció a un ritmo del 1%, mientras que el trigo panadero experimentó un crecimiento del 1.3% (Chávez Villalba *et al.*, 2015). A nivel mundial, el trigo cristalino se posiciona como el décimo cultivo de mayor importancia (Graziano *et al.*, 2019); con Estados Unidos, Canadá y México entre los principales países productores y exportadores. Esta especie de trigo es ampliamente valorado en la industria alimentaria debido a su versatilidad y aporte nutricional. Comparado con el trigo harinero, se distingue por su grano de tonalidad amarilla, mayor dureza y un gluten más fuerte, características fundamentales para la producción de pasta (Zingale *et al.*, 2023).

En México, las variedades comerciales de trigo se caracterizan por su alto potencial de rendimiento, así como por su resistencia a enfermedades y tolerancia a condiciones de baja disponibilidad hídrica. No obstante, en algunos casos, el grano cosechado no cumple con los estándares de calidad exigidos por la industria, debido a la presencia de un trastorno fisiológico conocido como “panza blanca”. Aunque este problema no afecta directamente el rendimiento del cultivo, sí repercute de manera negativa en la calidad industrial del grano (Moya & Díaz De León, 2001). Este trastorno se considera especialmente grave en granos de trigo harinero, trigo

duro y triticale, ya que compromete sus características físicas y funcionales (Zárate *et al.*, 2015).

La panza blanca se manifiesta como una alteración en la coloración del grano, particularmente en trigos de tipo cristalino, reduciendo significativamente su valor comercial (Rodríguez *et al.*, 2011). Su aparición está asociada principalmente a una deficiencia de nitrógeno en el suelo (Zárate *et al.*, 2015) y ocurre durante la fase de llenado del grano. En esta etapa, factores como temperaturas bajas y alta humedad relativa pueden alargar el tiempo de maduración de la semilla, lo que limita la absorción eficiente de nitrógeno por parte de la planta. Como consecuencia, se incrementa la acumulación de hidratos de carbono y disminuye el contenido de proteínas en el grano, afectando su calidad (Rodríguez *et al.*, 2011). Este defecto también tiene implicaciones para su comercialización. En México de acuerdo con la normativa, se establece un límite máximo del 10% de grano afectado por baya amarilla (término empleado como sinónimo de panza blanca) para que un lote de trigo sea aceptado para exportación (Ruíz *et al.*, 2009).

Por otro lado, cantidad de fertilizante nitrogenado aplicada, así como el momento de su aplicación, no solo inciden en la calidad del grano de trigo, sino también ejercen un efecto significativo sobre su rendimiento (Sohail *et al.*, 2018). La calidad del grano, a su vez, es un criterio fundamental para su comercialización. En este sentido, la Norma Oficial Mexicana NOM-FF-36-1984 (DOF, 1984), que regula la comercialización de productos alimenticios, establece una clasificación del trigo (*Triticum aestivum* y *durum*) en cinco grupos de calidad, considerando, entre otros aspectos, las propiedades físicas del grano. Para esta clasificación, se evalúan parámetros como el peso hectolítrico, el peso de mil granos, el tamaño y la forma del grano, su dureza, el estado fitosanitario y los daños causados por factores abióticos, así como el contenido de humedad (Olán *et al.*, 2012).

Dada la importancia del trigo duro en la industria alimentaria y el impacto que pueden tener factores fisiológicos como la panza blanca sobre su calidad y valor

comercial, resulta fundamental evaluar prácticas de manejo agronómico, como el régimen de riego y la fertilización nitrogenada, cuya aplicación no solo influye en el rendimiento del cultivo, sino que también puede afectar la calidad física del grano. En este contexto, en el presente estudio se plantea el siguiente objetivo general:

1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de diferentes niveles de riego y fertilización nitrogenada sobre la incidencia de panza blanca, así como en el rendimiento y la calidad física de genotipos de trigo cristalino (*Triticum durum* L.) bajo condiciones de campo.

1.1.1. Objetivos específicos

1. Estimar el efecto de tres niveles de riego y fertilización nitrogenada, aplicados en dos localidades, sobre la incidencia de panza blanca, el rendimiento y la calidad física de genotipos de trigo cristalino.
2. Determinar las interacciones significativas entre los factores evaluados y su efecto conjunto sobre la incidencia de panza blanca, el rendimiento y la calidad física de los genotipos de trigo cristalino.

1.2. Hipótesis

Hi. La aplicación de diferentes niveles de riego y fertilización nitrogenada en dos localidades y utilizando tres genotipos de trigo cristalino (*Triticum durum* L.), influye de manera significativa en la incidencia de panza blanca, así como en el rendimiento y la calidad física del grano.

Ho. La aplicación de diferentes niveles de riego y fertilización nitrogenada en dos localidades y utilizando tres genotipos de trigo cristalino (*Triticum durum* L.), no tiene un efecto significativo sobre la incidencia de panza blanca, el rendimiento y la calidad física del grano.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Importancia económica y productiva del trigo cristalino en México

En México, la producción de trigo grano se divide en: cristalino, destinado principalmente a la elaboración de pastas, y el trigo harinero, utilizado en la producción de pan, repostería y harinas. El trigo cristalino representa el 59.79% de la producción nacional, lo que permite cubrir la demanda interna y posiciona a México como el tercer mayor exportador mundial de este cereal. En contraste, la producción de trigo harinero es insuficiente para abastecer el consumo del país, por lo que se depende de importaciones que representan el 74.93% del total requerido (SAGARPA, 2017).

Sonora es el estado con mayor producción de trigo en México, aportando el 54.77% del total nacional, seguido por Baja California, Guanajuato, Michoacán y Sinaloa, que en conjunto representan el 36% de la producción (Torres *et al.*, 2022). Durante los ciclos agrícolas de 2020 y 2021, la producción promedio anual fue de 3.12 millones de toneladas, con Sonora generando aproximadamente 1.62 millones de toneladas cada año. En este estado, el 80% de la superficie cultivada se destina al trigo cristalino, destacando la variedad CIRNO C2008, la cual ofrece un alto rendimiento, aunque es vulnerable a enfermedades fúngicas como las royas (*Puccinia*) (INIFAP, 2024). El trigo cultivado en esta región es reconocido por su alta calidad, debido tanto a las condiciones climáticas como a las variedades empleadas (Chávez *et al.*, 2015).

Para el ciclo otoño-invierno (OI) 2024, la superficie sembrada alcanzó 218,160 hectáreas, un 11% menos que en OI 2023. Esto se tradujo en una producción de 1.4 millones de toneladas, lo que representa una caída del 25% respecto al ciclo anterior, con 457,777 toneladas menos. El rendimiento nacional también disminuyó, pasando de 7.7 toneladas por hectárea en 2023 a 6.5 toneladas por hectárea en 2024, una reducción del 16%. Por otro lado, la producción del ciclo primavera-

verano (PV) es mínima, representando menos del 1% del total nacional (SIAP, 2024).

Uno de los factores determinantes en la reducción de la producción de trigo cristalino en México ha sido la baja disponibilidad de agua, que se encuentra por debajo del 50%. Esta situación ha generado preocupación entre los productores, ya que podría llevar al país a importar trigo cristalino por primera vez en su historia (Hablemos del campo, 2025).

El trigo cristalino, utilizado principalmente en la producción de pasta, no solo es relevante desde el punto de vista económico, sino también por sus beneficios nutricionales. Así mismo, su alto contenido de proteínas y fibra dietética, junto con vitaminas y minerales esenciales, contribuye a la prevención de enfermedades como la diabetes y las afecciones cardiovasculares (Taranto *et al.*, 2023).

2.2. Calidad física de la semilla de trigo

La calidad de la semilla de trigo depende de diferentes atributos que influyen en su establecimiento y desarrollo en el campo. Entre los más relevantes se encuentran la calidad genética, fisiológica, física y sanitaria. En particular, la calidad física comprende parámetros como el contenido de humedad, peso volumétrico, peso de mil semillas y coloración, características que son fundamentales tanto para los productores de semilla como para los consumidores finales (Martínez, 2017).

Dentro de los parámetros físicos del trigo, el peso hectolítrico es uno de los más relevantes en el comercio mundial, ya que influye directamente en el rendimiento harinero. Este valor, expresado en kg hl^{-1} , está determinado por la densidad real del grano, la cual a su vez depende de su estructura biológica, composición química y contenido de humedad. El tamaño y la forma del grano afectan este peso, así como la presencia de granos inmaduros, daños por sequía o enfermedades, que pueden reducir significativamente el peso hectolítrico y, por ende, afectar el rendimiento de harina (Olán *et al.*, 2012).

2.3. Coloración del grano

El color amarillo brillante de la pasta es un atributo de calidad muy apreciado por los consumidores y se debe a la presencia de carotenoides en el endospermo del grano. Su concentración, altamente hereditaria, puede ser evaluada con precisión mediante espectroscopia de reflectancia, analizando parámetros de color como brillo (L^*), rojo (a^*) y amarillez (b^*). Valores superiores a 30 en el índice b^* indican una sémola de alta calidad, lo que impacta directamente en el atractivo comercial del trigo cristalino (Hare, 2017). Los carotenoides, cumplen funciones esenciales en la fotosíntesis y en la protección celular contra el estrés oxidativo. En este sentido, los carotenoides, en especial la luteína y la zeaxantina, tienen beneficios nutricionales importantes, incluyendo propiedades antioxidantes y provitamina A, además de contribuir a la prevención de enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer (Rodríguez *et al.*, 2023).

2.4. Panza blanca en trigo cristalino

La panza blanca es un trastorno fisiológico del grano de trigo caracterizado por un alto contenido de almidón y una reducción en el contenido de proteína. Esta condición afecta negativamente la calidad de los productos derivados, como pan y pasta, lo que conlleva a penalizaciones económicas para los productores (Rodríguez *et al.*, 2014). Los granos con panza blanca se distinguen por una apariencia lisa (Serranti *et al.*, 2013) y una apariencia moteada debido a manchas que van desde blanco a blanco amarillento dependiendo del color de las capas externas de la semilla (Moya & Díaz De León, 2001). En los granos afectados por panza blanca se forman áreas donde los gránulos de almidón no están adecuadamente unidos, estas regiones, caracterizadas por un bajo contenido de proteína, presentan espacios vacíos de aire que se manifiestan como parches claros y moteados, que, en condiciones normales, dichos espacios están ocupados por una matriz proteica que contribuye a la integridad del grano (Hare, 2017).

En México, la calidad del grano de trigo se evalúa principalmente a través de su contenido proteico, el cual depende de factores como la fertilización nitrogenada, los riegos auxiliares, la variedad y la temperatura. Un bajo nivel de proteína en el trigo implica sanciones económicas para los agricultores, lo que resulta en un gasto financiero. Para incrementar el contenido proteico, se recurre con frecuencia a fertilizantes nitrogenados, lo que aumenta los costos de producción y el riesgo de contaminación por lixiviación de nitrógeno en los suelos (Ramírez *et al.*, 2017). En este contexto panza blanca es considerado como un problema grave, que generalmente se ha relacionado principalmente, a la deficiencia de nitrógeno en el suelo, lo que reduce el contenido de proteínas y disminuye la calidad del grano para la industria harinera y de la pasta (Ponce *et al.*, 2010).

2.5. La fertilización nitrogenada en el rendimiento e incidencia de panza blanca en el grano de trigo

La fertilización nitrogenada es fundamental en el crecimiento, desarrollo y productividad del trigo, al influir directamente en el rendimiento y la calidad del cultivo. Sin embargo, el uso intensivo de fertilizantes nitrogenados en los últimos años ha incrementado los costos de producción y no siempre se ha traducido en mejoras proporcionales en el rendimiento. Además, su aplicación excesiva conlleva riesgos ambientales, como la volatilización, desnitrificación y lixiviación, que reducen la eficiencia del fertilizante y generan contaminación. La absorción excesiva de nitrógeno puede reducir la tasa de translocación de nitrógeno hacia la semilla, afectar la movilización de asimilados fotosintéticos y conducir a poblaciones de cultivos con alto crecimiento vegetativo y a una mayor competencia por las reservas de origen (Meng *et al.*, 2024).

En el trigo cristalino, la incidencia de panza blanca se asocia principalmente con una baja fertilización nitrogenada, el uso de variedades sensibles y el número de riegos aplicados. Sin embargo, la disponibilidad de nitrógeno es el factor más determinante, aunque su impacto no está directamente correlacionado con el rendimiento del cultivo (Ponce *et al.*, 2010).

Asimismo, condiciones climáticas como bajas temperaturas, alta nubosidad y elevada humedad relativa durante el llenado del grano pueden extender el ciclo de crecimiento, lo que favorece la acumulación de hidratos de carbono en detrimento del contenido proteico y del gluten. Cuanto más largo es el período de llenado, mayor presencia de granos panza blanca, lo cual se acentúa cuando la disponibilidad de nitrógeno es baja (Castro, 2022).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Material genético

Para el desarrollo del proyecto de investigación se consideraron 2 líneas avanzadas de trigo cristalino, a los cuales llamaremos genotipos y son: 706 y 748 provenientes del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), utilizando como testigo a la variedad Cirno.

3.2. Ubicación del experimento

El estudio se realizó en dos localidades correspondientes a campos experimentales de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, descritas a continuación.

Zaragoza, Coahuila

Ubicada en las coordenadas 28° 33' latitud norte y 100° 55' longitud oeste, a una altitud de 350 m. Presenta un clima seco, semicálido, extremoso, con inviernos frescos, con una temperatura media anual de 21.4 °C (Sánchez *et al.*, 2022).

Navidad, Nuevo León

Campo Experimental Ing. Humberto Treviño Siller, localizado en las coordenadas 25° 04' de latitud norte y 100° 37' de longitud oeste, a una altitud de 1,895 m. Su clima es semiárido templado, con una temperatura media anual de 14.6 °C (Sánchez *et al.*, 2022).

3.3. Establecimiento de experimentos en campo

De acuerdo con las fechas de siembra recomendadas para cada región, las parcelas fueron sembradas el 22 de diciembre de 2023 en Zaragoza, Coahuila, y el 18 de enero de 2024 en Navidad, N.L., con una densidad de siembra de 80 kg ha⁻¹.

Los experimentos se establecieron bajo un diseño de bloques completos al azar con arreglo de parcelas subdivididas y dos repeticiones. Las parcelas grandes correspondieron a tres niveles de riego (alto, medio y bajo); las parcelas medianas, a tres niveles de fertilización (260, 130 y 32 kg de N ha⁻¹) y las parcelas pequeñas a los 3 genotipos. Cada unidad experimental consistió en dos camas con dos hileras de 2 m de largo x 0.90 m de ancho.

Se instaló un sistema de riego por cintilla para manejar los distintos niveles de riego, y se realizó una primera aplicación de fertilización al inicio del experimento.

3.4. Aplicación de fertilización y riego

El fósforo (P) se aplicó a razón de 100 kg ha⁻¹ durante la preparación del suelo, en ambas localidades. Las aplicaciones de los diferentes niveles de fertilización y riego se realizaron conforme a lo descrito en las Cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. Porcentaje de fertilizante nitrogenado aplicado en distintas etapas fenológicas del cultivo de trigo, de acuerdo con la localidad y nivel de fertilización.

Localidad	Nivel de fertilización	Dosis (kg N ha ⁻¹)	Siembra	Principio de macollamiento	Final de espigamiento	Llenado de grano
Zaragoza	1 (alto)	260	36%	47%	17%	-
	2 (medio)	130	48%	47%	5%	-
	3 (bajo)	32	100%	-	-	-
Navidad	1 (alto)	260	36%	33%	16%	15%
	2 (medio)	130	48%	18%	18%	16%
	3 (bajo)	32	100%	-	-	-

Cuadro 2. Calendario de aplicación de riegos de auxilio por etapa fenológica en dos localidades.

No. Riegos de auxilio	Nivel de riego			Fecha de aplicación Zaragoza	Fecha de aplicación Navidad	Etapa fenológica
	Riego 1 (alto)	Riego 2 (medio)	Riego 3 (bajo)			
	✓	✓	✓	22/12/2023	18/01/2024	Siembra
1	✓	✓	✓	04/01/2024	02/02/2024	Germinación
2	✓	✓	✓	13/01/2024	27/02/2024	Macollamiento
3	✓	✓	✓	26/01/2024	08/03/2024	Inicio de encañe
4	✓	-	-	08/02/2024	18/03/2024	Encañe
5	✓	✓	-	22/02/2024	28/03/2024	Espigamiento
6	✓	-	✓	07/03/2024	08/04/2024	Espigamiento
7	✓	✓	-	21/03/2024	18/04/2024	Floración
8	✓	-	-	04/04/2024	29/04/2024	Floración
9	✓	✓	✓	18/04/2024	09/05/2024	Llenado de grano
10	✓	-	-	02/05/2024	20/05/2024	Llenado de grano
11	✓	✓	-	16/05/2024	30/05/2024	Madurez fisiológica

3.5. Cosecha, trilla y limpieza de las semillas de trigo de las localidades

La cosecha se llevó a cabo cuando las plantas alcanzaron la madurez fisiológica (Z89) (Zadoks *et al.*, 1974) en cada localidad. Se recolectaron las espigas de una cama (1.8 m² por unidad experimental) y fueron almacenadas en bolsas de papel para sus análisis posteriores.

Las espigas de las 54 muestras recolectadas por localidad se trillaron utilizando una máquina trilladora, para separar el grano de la paja. La prelimpieza se realizó con una máquina equipada con zarandas, para eliminar contaminantes físicos de mayor tamaño. Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de aireación con ventilador para remover partículas más pequeñas. La limpieza final se realizó manualmente,

eliminando impurezas remanentes como piedras, semillas de otras especies y restos vegetales. Las semillas limpias fueron almacenadas en bolsas de papel para sus posteriores análisis.

3.6. Variables de respuesta

Las variables de respuesta evaluadas en los experimentos fueron: rendimiento de grano; incidencia de panza blanca y calidad física del grano, determinada mediante la coloración, el peso de mil semillas y el peso hectolítrico.

3.6.1. Determinación de rendimiento de grano

A todas las muestras de granos de trigo de ambas localidades se les estimó el peso (g) y el porcentaje de humedad utilizando el equipo agratronix™ modelo MT-PRO. Con estos datos se calculó el rendimiento del grano por unidad de superficie (ajustado al 12% de humedad).

Para determinar el rendimiento en base seca, se emplearon las fórmulas propuestas por Verhulst *et al.* (2012):

$$\text{Área cosechada (m}^2\text{)} = \text{Ancho (m)} \times \text{Longitud (m)}$$

$$\text{Cantidad de humedad (g)} = \frac{\text{Peso del grano total} \times \text{Porcentaje de humedad}}{100}$$

$$\text{Rendimiento seco } \left(\frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) = \frac{\text{Peso del grano total} - \text{Cantidad de humedad}}{\text{Área cosechada}} \times 10$$

$$\text{Rendimiento al 12\% de humedad } \left(\frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) = \frac{\text{Rendimiento seco}}{0.88}$$

3.6.2. Evaluación de la coloración de los granos

La coloración de los granos se determinó utilizando un colorímetro digital portátil FRU® modelo WR-10QC, de acuerdo con el método de Hunter. Esta metodología define una superficie uniforme de color mediante tres coordenadas rectangulares: L (luminosidad) donde 0 representa el negro y 100 el blanco; a (matiz rojo-verde), con valores positivos para rojo, negativos para verde y 0 neutro; mientras que b (eje amarillo-azul) con valores positivos para amarillo, negativos para azul y 0 como punto neutro (Mathias-Rettig & Ah-Hen, 2014). En el ensayo se registraron los valores de L, a y b, realizando 3 repeticiones para cada una de las muestras.

3.6.3. Estimación del porcentaje de panza blanca

El contenido de panza blanca se determinó de acuerdo con la metodología de Zárate et al. (2015), 50 g de grano de trigo se pesaron y separaron manualmente; posteriormente, los granos que presentaron manchas blanco-amarillentas en más del 25% de su superficie, conforme a la norma mexicana NMX-FF-055-1984 (DOF, 1984), se consideraron como granos de trigo con panza blanca. Se analizaron 54 muestras considerando 3 repeticiones de cada una, un total de 162 muestras. Los granos con este defecto fueron pesados y se reportaron como porcentaje en peso de panza blanca.

3.6.4. Determinación del peso de mil semillas

El peso de mil semillas (PMS) se determinó mediante el conteo y peso (g) de ocho repeticiones de 100 semillas cada una. Se estimó la media, la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Durante el ensayo se aseguró que el coeficiente de variación fuera inferior a 4, por lo tanto, el peso de mil semillas se obtuvo multiplicando la media aritmética de las ocho repeticiones por 10 (ISTA, 2018).

3.6.5. Estimación del peso hectolítrico

El peso volumétrico se estimó de acuerdo con la metodología de Carranza *et al.* (2022) depositando 50 g de semilla en una probeta con capacidad de 100 ml. Se registró el volumen ocupado por la semilla en la probeta, y para obtener los resultados del peso hectolítrico (PHL) se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Kg hl}^{-1} = \frac{\text{Peso de semilla (50 g)}}{\text{Volumen ocupado (ml)}} \times 100$$

3.7. Análisis estadístico

Se llevaron a cabo análisis de varianza ($p \leq 0.01$ y $p \leq 0.05$) con el propósito de evaluar el efecto de los factores localidad, riego, fertilización y genotipo, así como sus interacciones, sobre cada una de las variables estudiadas. En los casos en que se detectaron diferencias significativas, se realizó una comparación de medias mediante la prueba de Tukey, con un nivel de significancia del 5 %, utilizando el software estadístico InfoStat (versión 5.13). Además, se efectuaron análisis de correlación de Pearson para determinar el grado de asociación entre las variables.

Para el análisis de los datos se utilizó el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{lijkr} = \mu + L_l + I_i + F_j + G_k + (LI)_{li} + (LF)_{lj} + (LG)_{lk} + (IF)_{ij} + (IG)_{ik} + (FG)_{jk} + (LIF)_{lij} \\ + (LIG)_{lik} + (LFG)_{ljk} + (IFG)_{ijk} + (LIFG)_{lijk} + R_r(L) + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

Y_{lijkr} = Valor observado de la variable de interés.

μ = Media general.

L_l = efecto de la localidad l .

I_i = Efecto del riego i .

F_j = Efecto de la fertilización j .

G_k = Efecto del genotipo k .

(LI) , (LF) , (LG) , (IF) , (IG) , (FG) , (LIF) , (LIG) , (LFG) , (IFG) , $(LIFG)$ = Interacciones entre factores.

$R_r(L)$ = Efecto de la repetición anidado dentro de localidad.

$\varepsilon_{lijk\tau}$ = Error experimental.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Rendimiento de grano

El análisis de varianza (Cuadro 3) muestra que el rendimiento de grano estuvo significativamente influenciado por la localidad y el nivel de riego ($p \leq 0.01$), mientras que el factor fertilización tuvo un efecto significativo, aunque de menor magnitud ($p \leq 0.05$). Adicionalmente, se observaron interacciones significativas entre localidad $\times$ riego ($p \leq 0.05$) y localidad $\times$ fertilización ($p \leq 0.01$), de manera que las prácticas de manejo agronómico y el ambiente de las localidades influyeron en la respuesta del rendimiento de grano.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de varianza y considerando únicamente los factores que mostraron efectos estadísticamente significativos ($p \leq 0.01$ y $p \leq 0.05$), se procedió a realizar una prueba de comparación de medias. La Figura 1 muestra el comportamiento del rendimiento de grano en función de los efectos principales de localidad, riego y fertilización. Se observó que la localidad de Zaragoza presentó el mayor rendimiento promedio (3.1 t ha^{-1}), en comparación con la localidad de Navidad, que registró valores de 2.3 t ha^{-1} . En cuanto al factor riego, el nivel alto resultó en un rendimiento significativamente superior (3.4 t ha^{-1}), en contraste con los niveles medio y bajo, que mostraron rendimientos de 2.4 y 2.3 t ha^{-1} , respectivamente. Por su parte, el efecto de la fertilización mostró una menor diferencia entre los niveles evaluados; sin embargo, el nivel medio alcanzó el mayor rendimiento (3.0 t ha^{-1}), seguido por los niveles bajo (2.6 t ha^{-1}) y alto (2.5 t ha^{-1}).

Los resultados de este estudio demostraron que la localidad y los niveles de riego ejercieron una mayor influencia sobre el rendimiento del grano de trigo, ya que la mayor productividad del grano se logró en condiciones de alta disponibilidad hídrica, en una localidad con condiciones posiblemente más favorables y a una dosis media de fertilización (130 kg N ha^{-1}). Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Ledesma *et al.* (2010) quienes evaluaron diferentes combinaciones de riegos de auxilio y dosis de nitrógeno en México, con genotipos de trigo harinero y cristalino, observando que los mayores rendimientos ($5079 - 5203 \text{ kg ha}^{-1}$) se alcanzaron con cuatro riegos y dosis de 160 y 240 kg N ha^{-1} . En cambio, al reducir los riegos a tres y aplicar dosis de 120, 160 y 240 kg N ha^{-1} , los rendimientos disminuyeron ($3968 - 4015 \text{ kg ha}^{-1}$), por lo que a una mayor disponibilidad de humedad mejora la eficiencia en el uso del nitrógeno en trigo.

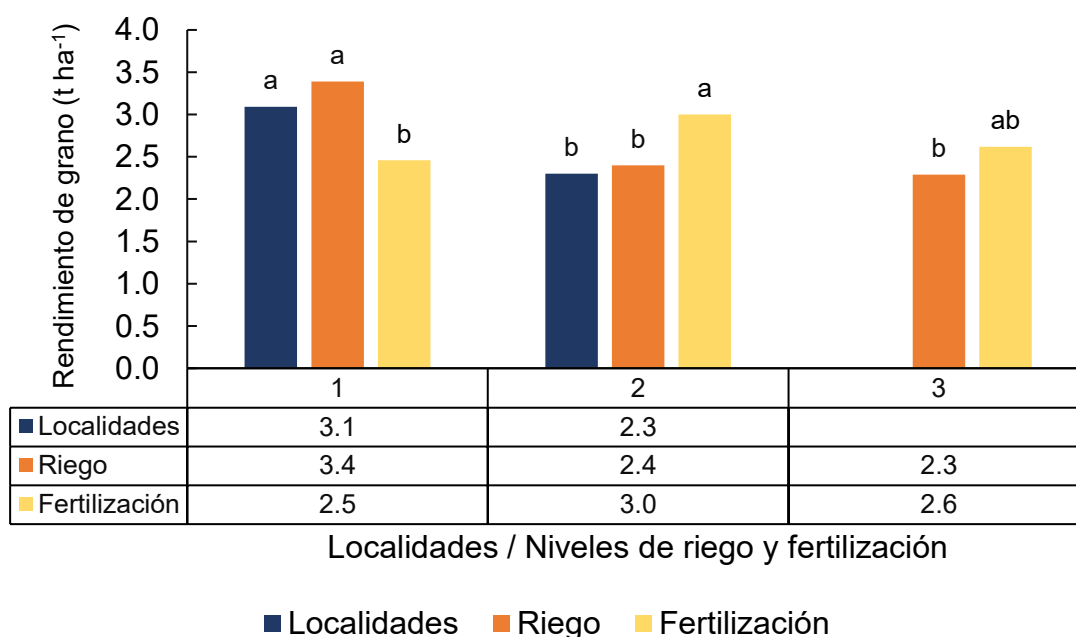


Figura 1. Efectos principales de la localidad, riego y fertilización sobre los valores medios del rendimiento de grano en trigo cristalino.

Localidad 1 = Zaragoza; Localidad 2 = Navidad. Fertilización (kg N ha^{-1}): niveles 1 (260), 2 (130) y 3 (32). Riego: niveles 1 (alto), 2 (medio) y 3 (bajo). Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0.05$).

La Figura 2 muestra el efecto de las interacciones localidad $\times$ riego y localidad $\times$ fertilización sobre el rendimiento de grano. Se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre las combinaciones evaluadas. El mayor rendimiento se alcanzó en la combinación ZR1 (Zaragoza con riego alto), con un promedio de 4.0 t ha^{-1} , seguido por las combinaciones ZF2 y ZF3 (fertilización media y baja en la misma localidad), con valores de 3.4 t ha^{-1} . En contraste, los menores rendimientos se presentaron en las combinaciones NR3 y NF3 (Navidad con riego y fertilización bajos), con promedios inferiores a 2.0 t ha^{-1} , que en este caso pudimos notar el efecto adverso cuando se trata de condiciones más limitantes.

Los resultados obtenidos evidencian que el rendimiento de grano está influenciado tanto por las condiciones del entorno (localidad) como por el manejo agronómico, siendo el factor de riego el de mayor efecto, seguido de la fertilización. El análisis de las diferentes combinaciones de factores mostró que la respuesta del rendimiento no es uniforme, sino que mucho depende de la interacción entre ellos. Por lo tanto, es importante diseñar estrategias de manejo agronómico específicas para cada localidad, considerando sus condiciones de cada una.

De conformidad con estos hallazgos, Assefa *et al.* (2023) evaluaron diferentes dosis de N (0, 90, 180 y 270 kg N ha^{-1}) en el cultivo de trigo cristalino y reportaron rendimientos de 686, 2487, 3523 y 3794 kg ha^{-1} , respectivamente, resultados que coinciden con lo observado en la presente investigación, donde también es importante la disponibilidad de nitrógeno, ya que favorece significativamente la productividad del cultivo.

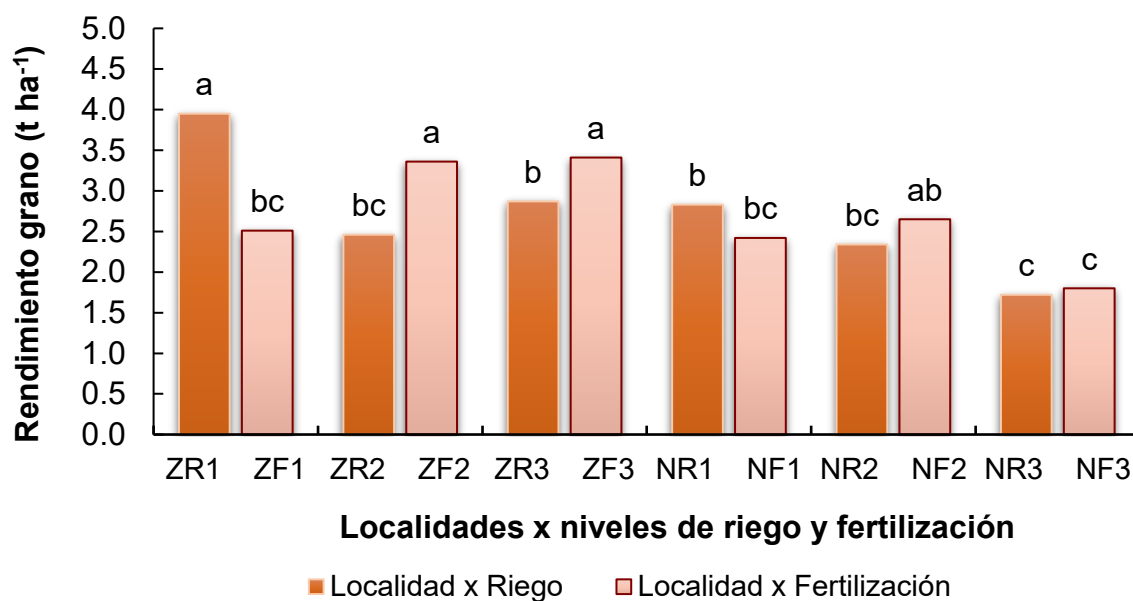


Figura 2. Efecto de las interacciones entre localidad x riego y localidad x fertilización sobre los valores medios del rendimiento de grano en trigo cristalino.

Z = Zaragoza, N = Navidad; R = riego, F = fertilización. Fertilización (kg N ha⁻¹): niveles 1 (260), 2 (130) y 3 (32). Riego: niveles 1 (alto), 2 (medio) y 3 (bajo). Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0.05$).

4.2 Calidad física del grano

4.2.1. Coloración del grano

En el método de Hunter, el parámetro L representa la luminosidad, donde un valor de 100 corresponde al blanco y un valor de 0 al negro. El eje a indica la tonalidad entre rojo (+a) y verde (-a), mientras que el eje b representa la variación entre amarillo (+b) y azul (-b) (Romero *et al.*, 2010). Los resultados de los cuadrados medios obtenidos en el análisis de varianza para los tres parámetros de coloración del grano de trigo se presentan en el Cuadro 3. El valor de luminosidad (L) fue afectado significativamente por localidad ($p \leq 0.01$), fertilización ($p \leq 0.05$) y genotipo

($p \leq 0.01$). Además, se observaron múltiples interacciones significativas, incluyendo localidad $\times$ riego, localidad $\times$ genotipo y riego $\times$ fertilización ($p \leq 0.01$), así como triples interacciones tales como, localidad $\times$ fertilización $\times$ genotipo y riego $\times$ fertilización $\times$ genotipo ($p \leq 0.05$). Esto evidencia que la luminosidad del grano responde de manera compleja a la combinación de factores ambientales, genéticos y de manejo agronómico.

Respecto al valor +a (rojo), se encontraron efectos significativos relevantes para todos los factores y sus interacciones ($p \leq 0.01$ y $p \leq 0.05$) a excepción de riego, riego $\times$ genotipo y fertilización $\times$ genotipo (Cuadro 3), por lo que es posible considerar que la expresión de este atributo cromático depende de múltiples factores combinados.

El valor +b (amarillo), considerado como un parámetro crítico en la calidad del trigo cristalino, fue significativamente influenciado por fertilización ($p \leq 0.05$) y genotipo ($p \leq 0.01$). Se presentaron también interacciones significativas en localidad $\times$ riego ($p \leq 0.01$), localidad $\times$ riego $\times$ fertilización ($p \leq 0.05$), así como localidad $\times$ fertilización $\times$ genotipo, riego $\times$ fertilización $\times$ genotipo y localidad $\times$ riego $\times$ fertilización ($p \leq 0.01$). Estos resultados nos señalan que el componente amarillo del grano es altamente sensible tanto al ambiente como al manejo agronómico y al genotipo.

En términos generales la coloración del grano presenta una respuesta más compleja y multifactorial, lo que resalta la necesidad de estrategias integradas de manejo para optimizar de forma simultánea el rendimiento y la calidad física del grano.

Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables rendimiento y coloración de grano de tres genotipos de trigo cristalino.

Fuentes de variación	G.L.	Rendimiento (t ha ⁻¹)	G.L.	Valor L	Valor a	Valor b
Localidad	1	17.71**	1	842.73**	6.27**	6.72 ns
Repetición	1	0.0005	2	17.15	0.26	3.02
Riego	2	13.64**	2	3.14 ns	1.49 ns	3.24 ns
Fertilización	2	2.32*	2	28.78*	2.11*	7.24*
Genotipo	2	0.87 ns	2	128.62**	6.06**	33.69**
Localidad*Riego	2	2.84*	2	98.99**	7.87**	22.29**
Localidad*Fertilización	2	5.08**	2	2.59 ns	11.39**	1.02 ns
Localidad*Genotipo	2	0.30 ns	2	59.99**	2.79**	3.75 ns
Riego*Fertilización	4	1.10 ns	4	72.64**	3.57**	1.81 ns
Riego*Genotipo	4	0.28 ns	4	7.99 ns	0.59 ns	3.78 ns
Fertilización*Genotipo	4	0.20 ns	4	3.20 ns	0.39 ns	2.31 ns
Localidad*Riego*Fertilización	4	0.69 ns	4	14.07 ns	2.07**	7.20*
Localidad*Riego*Genotipo	4	0.61 ns	4	8.43 ns	1.57*	4.73 ns
Localidad*Fertilización*Genotipo	4	0.38 ns	4	21.95*	1.36*	12.89**
Riego*Fertilización*Genotipo	8	0.53 ns	8	16.74*	1.97**	6.42**
Localidad*Riego*Fertilización*Genotipo	8	0.24 ns	8	3.44 ns	1.73**	6.69**
Error	51	0.62	106	6.29	0.52	2.07
Total	105		161			
C.V. (%)		29.32		4.21	6.5	6.25

Valor L= luminosidad, valor +a= rojo, valor +b= amarillo. Valores significativos *= $p \leq 0.05$; valores altamente significativos**= $p \leq 0.01$; ns = no significativo. C.V. = coeficiente de variación; G.L. = grados de libertad.

Conforme a los resultados del análisis de varianza y considerando las fuentes de variación e interacciones que coincidieron en los tres componentes de coloración, se realizaron prueba de medias para los efectos más sobresalientes que fueron: genotipo y la interacción localidad x riego.

Los genotipos evaluados mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en los valores de coloración del grano (Figura 3). El genotipo 748 presentó el valor de luminosidad más alto (61.00), indicando granos más claros, significativamente

superiores a los genotipos Cirno (59.84) y 706 (57.95). Para el valor +a (rojo), los genotipos Cirno y 748 resultaron estadísticamente iguales con los valores más altos 11.09 y 11.34, respectivamente. Por otro lado, el valor b, que representa la intensidad del color amarillo, fue mayor en el genotipo 748 (23.92), superando a los genotipos 706 (22.54) y Cirno (22.57).

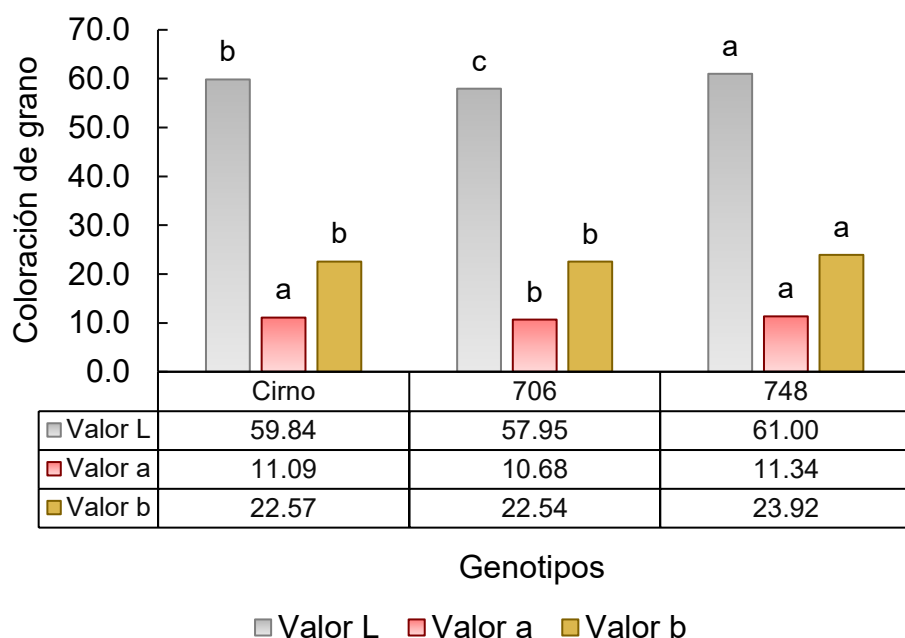


Figura 3. Valores medios de los componentes de coloración en tres genotipos de trigo cristalino.

Valor L = luminosidad, valor +a = rojo, valor +b = amarillo. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0.05$).

Al analizar la interacción entre los niveles de riego y las localidades Zaragoza y Navidad (Figura 4), se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$). El mayor valor de luminosidad (63.06) se observó en el tratamiento con riego nivel alto en Zaragoza, mientras que el menor valor (55.59) correspondió al nivel de riego alto en la localidad de Navidad. En cuanto al componente de la coloración roja, los valores mayores se encontraron en Navidad con los riegos alto y medio (11.20 y 11.50

respectivamente) y en Zaragoza con el riego bajo (11.45). Respecto al valor b, la mayor intensidad de amarillo se presentó en el tratamiento Zaragoza con bajo nivel de riego (23.69), mientras que el tratamiento Navidad con riego bajo mostró el valor más bajo (22.05).

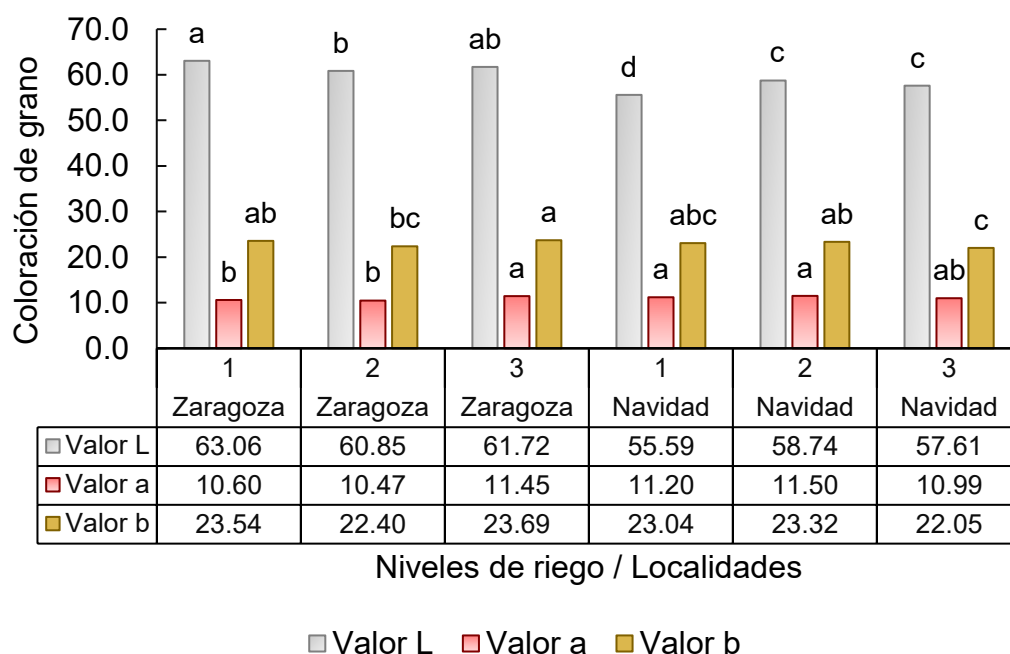


Figura 4. Efecto de las interacciones entre localidad x riego sobre los valores medios de los componentes de coloración de granos de trigo cristalino.

Valor L = luminosidad, valor +a = rojo, valor +b = amarillo. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0.05$).

Los resultados de coloración obtenidos en esta investigación fueron muy similares en luminosidad y más altos en valores de a y b, que los reportados por Martín *et al.* (2021) en granos de trigo, donde la luminosidad (valor L) del grano fue de 60, mientras que los valores de +a se ubicaron entre 6 y 7. En este contexto, los valores +a asociados al eje rojo del espacio de color, pueden estar relacionados con la presencia de antocianinas. Por su parte, los valores de +b se encontraron entre 15

y 16, lo cual indica un contenido apreciable de carotenoides, responsables de la tonalidad amarilla del grano.

En el caso del trigo cristalino, esta coloración se atribuye principalmente a dos clases naturales de pigmentos: los carotenoides y las antocianinas. Los carotenoides, localizados en el endospermo, confieren la pigmentación amarilla característica de la sémola, lo cual es un atributo de calidad relevante para la industria y la comercialización de productos derivados del trigo cristalino. Por otro lado, las antocianinas se acumulan predominantemente en las capas externas del grano, como la aleurona o el pericarpio, y son responsables de tonalidades que varían entre azul, morado y rojo (Ficco *et al.*, 2014).

4.2.2. Análisis de varianza para el contenido de panza blanca, peso de mil semillas y peso hectolítrico

El análisis de varianza mostró efectos altamente significativos ($p \leq 0.01$) de los factores principales: localidad, riego, fertilización y genotipo (Cuadro 4), sobre las variables de calidad física evaluadas: porcentaje de panza blanca (PB), peso hectolítrico (PHL) y peso de mil semillas (PMS), con excepción del efecto de localidad sobre PHL, que no fue significativo.

En el caso de PB, los factores que contribuyeron en gran medida a la variación observada fueron: la fertilización (191.92**), riego (107.39**), localidad (100.84**) y la interacción localidad x fertilización (134.86**); lo que indica una fuerte influencia de estos factores sobre la expresión del defecto de PB. Además, se observaron efectos significativos de todas las interacciones de segundo y tercer orden, por lo que es posible que la presencia de PB dependa de combinaciones específicas de condiciones ambientales y manejo agronómico, así como de las características genéticas del cultivo.

Para el peso hectolítrico (PHL), se detectaron efectos significativos del riego (14.82**), genotipo (17.95**) y sobresaliendo el factor fertilización (98.50**), además

de sus respectivas interacciones. Destacan las interacciones localidad × riego (54.49**) y localidad × fertilización (51.32**), indicando que el ambiente local y el manejo agronómico influye fuertemente sobre esta variable, la cual es un parámetro importante de la calidad comercial del grano.

En cuanto al PMS, el genotipo presentó el mayor efecto (3158.19**), lo que revela que esta variable está principalmente determinada por la genética del cultivo. No obstante, el riego (654.78**) y la fertilización (310.39**), así como sus interacciones con la localidad, también influyeron significativamente ($p \leq 0.01$), lo que pone de manifiesto que un adecuado manejo hídrico y nutricional puede potenciar la expresión genética del peso de semilla.

El coeficiente de variación fue bajo para PHL (1.02%) y PMS (3.72%), y moderado para PB (13.08%), lo que indica una buena precisión experimental en las mediciones. Estos resultados resaltan la complejidad de los factores que influyen en la calidad física del grano y la necesidad de considerar tanto las condiciones ambientales como el manejo agronómico y el material genético en los programas de mejoramiento y producción de trigo cristalino.

Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de calidad física del grano de trigo.

Fuentes de variación	G.L.	PB (%)	PHL Kg hl ⁻¹	G.L.	PMS (g)
Localidad	1	100.84**	0.65 ns	1	56.7**
Repetición	2	0.16	0.96	7	2.84
Riego	2	107.39**	14.82**	2	654.78**
Fertilización	2	191.92**	98.50**	2	310.39**
Genotipo	2	13.85**	17.95**	2	3158.19**
Localidad*Riego	2	17.62**	54.49**	2	869.66**
Localidad*Fertilización	2	134.86**	51.32**	2	295.29**
Localidad*Genotipo	2	26.99**	3.93**	2	25.50**
Riego*Fertilización	4	26.57**	20.68**	4	168.25**
Riego*Genotipo	4	3.79**	13.54**	4	43.62**
Fertilización*Genotipo	4	17.02**	4.63**	4	70.88**
Localidad*Riego*Fertilización	4	18.83**	13.12**	4	110.47**
Localidad*Riego*Genotipo	4	11.64**	13.03**	4	88.08**
Localidad*Fertilización*Genotipo	4	11.17**	11.53**	4	118.67**
Riego*Fertilización*Genotipo	8	7.90**	5.12**	8	57.15**
Localidad*Riego*Fertilización*Genotipo	8	3.54**	3.57**	8	70.78**
Error	106	0.07	0.61	371	2.45**
Total	161			431	
C.V. (%)		13.08	1.02		3.72

Valores significativos * = $p \leq 0.05$; valores altamente significativos ** = $p \leq 0.01$; ns = no significativo. C.V. = coeficiente de variación; G.L. = grados de libertad; PB = panza blanca; PHL = peso hectolítrico; y PMS = peso de mil semillas.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de varianza y considerando los factores sobresalientes y sus interacciones con efectos estadísticamente significativos ($p \leq 0.01$ y $p \leq 0.05$) se procedió a realizar una prueba de comparación de medias, con el fin de identificar diferencias significativas entre niveles de los factores evaluados.

4.2.3. Análisis de comparación de medias para panza blanca

El análisis de comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) permitió identificar diferencias significativas entre los niveles de los factores evaluados para la variable de panza blanca (PB). Los resultados señalan que la incidencia de PB estuvo influenciada principalmente por la localidad, los niveles de riego y fertilización, así como el genotipo (Figura 5).

Con respecto a la localidad (Figura 5A), se observó una mayor expresión del defecto en Navidad, N.L. (2.86%), mientras que Zaragoza, Coah. presentó un valor significativamente menor (1.28%). En cuanto al nivel de riego (Figura 5A), el riego alto promovió la mayor incidencia de PB (3.56%), seguido por el riego medio (1.91%), mientras que el riego bajo resultó en la menor incidencia (0.75%). Las diferencias entre los tres niveles fueron estadísticamente significativas, lo que demuestra que a un manejo de riego restringido hay menor presencia de este carácter en el grano.

En relación con la fertilización, se encontró la mayor incidencia de PB (4.11%) al nivel más bajo, en contraste con los niveles 2 (1.71%) y 1 (0.40%), con diferencias altamente significativas entre tratamientos (Figura 5A). Estos resultados nos indican que la disminución de fertilización nitrogenada puede favorecer la aparición de este defecto en el grano.

Referente al análisis por genotipo mostró diferencias significativas entre los materiales (Figura 5B). El genotipo 748 presentó la mayor incidencia de PB (2.65%), seguido por el testigo Cirno (1.85%) y el genotipo 706, que mostró el menor valor (1.72%); por lo tanto, el factor genético también influye en la expresión de panza blanca.

Estos resultados evidencian que tanto los factores ambientales de la localidad, los niveles de riego, genotipo y principalmente la fertilización nitrogenada influyeron

significativamente en la incidencia de panza blanca, siendo de gran importancia su manejo para minimizar este defecto que afecta la calidad del grano.

En este contexto, diversos estudios han demostrado el efecto del N en la expresión de PB. Ibarra *et al.* (2023) reportaron que la presencia de granos PB en trigo cristalino fue afectada por las dosis de fertilización, con el porcentaje más alto (31%) observado en las dosis más bajas de N de 0 kg N ha⁻¹, mientras que en una dosis alta de 250 kg N ha⁻¹ obtuvieron resultados de 0%. Mon *et al.* (2016) realizaron dos años de experimentos y sus resultados revelaron que, en 2013, PB se expresó en 54 y 7% con dosis de N de 84 y 168 kg N ha⁻¹, respectivamente; en 2014 en 71 y 37% con dosis de N de 84 y 168 kg N ha⁻¹, respectivamente; mientras que en dosis de 252 kg N ha⁻¹ el contenido de PB fue insignificante. Además, se ha demostrado con estudios realizados en México que la aplicación de nitrógeno a razón de 150 kg N ha⁻¹ reduce considerablemente el contenido de PB en el grano de trigo resultados de hasta en un 1% (Ramírez *et al.*, 2014; Rodríguez *et al.*, 2014).

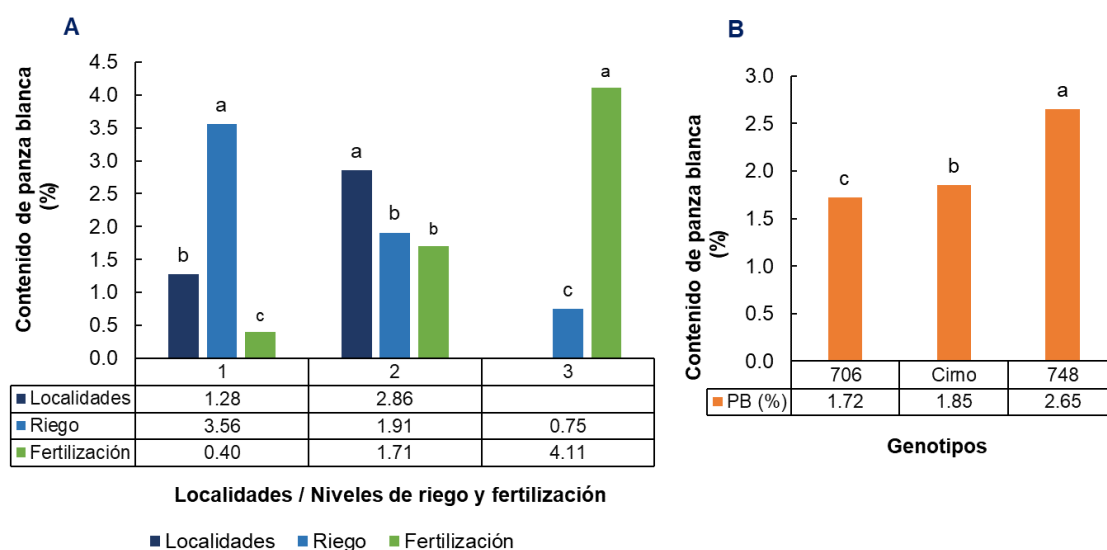


Figura 5. Efecto de la localidad, riego, fertilización (A) y genotipo (B) sobre los valores medios del contenido de panza blanca (PB) en trigo cristalino.

Fertilización (kg N ha⁻¹): niveles 1 (260), 2 (130) y 3 (32). Riego: niveles 1 (alto), 2 (medio) y 3 (bajo). Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0.05$).

4.2.4. Panza blanca: influencia de la localidad, riego, fertilización y genotipo

Es importante destacar los resultados obtenidos en la interacción de todos los factores con relación a la incidencia de panza blanca (PB). Se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la expresión de este defecto visual del grano, en función de la combinación entre localidad, riego, fertilización y genotipo (Cuadro 5). Los valores más altos de PB se registraron bajo condiciones de riego alto y baja fertilización (32 kg N ha⁻¹), en la localidad de Navidad y con el genotipo 748, alcanzando hasta 16.77 %, significativamente superior al resto de los tratamientos evaluados. Este mismo genotipo, bajo riego bajo, también mostró un contenido considerable de PB (10.22 %).

En el caso del genotipo Cirno, se observó una disminución progresiva de PB al aumentar los niveles de fertilización o al modificar el riego, con valores que variaron desde 9.55 % hasta 0.05 %. El genotipo 706 presentó los valores más bajos en la mayoría de los tratamientos, con incidencias desde 5.62 hasta 0.18%.

En términos generales, los tratamientos que combinaron alta y moderada fertilización (niveles 1 y 2) con un manejo riego medio y bajo, especialmente en Zaragoza, mostraron una notable disminución de PB en el grano. Estos resultados comprueban que la interacción entre las localidades, el manejo agronómico y el genotipo desempeñan un papel determinante en la incidencia de PB en trigo cristalino. Así mismo, en este estudio la incidencia de PB alcanzó niveles superiores al 15 % en ciertas combinaciones de manejo y genotipo, especialmente bajo condiciones de baja fertilización. Este hallazgo tiene implicaciones económicas relevantes, ya que los agricultores en México enfrentan penalizaciones comerciales cuando el porcentaje de granos afectados por defectos visuales, cuando PB, supera el contenido del 15 a 20 % (Grahmann *et al.*, 2014). En este contexto, el manejo agronómico estratégico orientado a la reducción de PB no solo mejora la calidad física del grano, sino que también contribuye a evitar descuentos en el precio final, lo cual es muy importante para los agricultores en la rentabilidad del cultivo.

Cuadro 5. Efecto de la interacción de la localidad, riego, fertilización y genotipo sobre los valores medios del contenido de panza blanca (PB) en trigo cristalino.

Localidad	Riego	Fertilización	Genotipo	PB (%)
Navidad	1	3	748	16.77 a
Navidad	2	3	748	10.22 b
Navidad	1	3	Cirno	9.55 b
Navidad	2	3	Cirno	7.65 c
Navidad	2	3	706	5.62 d
Zaragoza	1	3	748	4.74 de
Zaragoza	1	3	706	4.54 e
Navidad	1	2	748	4.28 ef
Zaragoza	1	2	Cirno	4.19 ef
Navidad	1	3	706	3.92 ef
Zaragoza	1	2	706	3.88 ef
Navidad	1	2	Cirno	3.51 ef
Zaragoza	2	2	706	3.39 fg
Navidad	3	3	748	2.90 gh
Navidad	3	3	Cirno	2.47 hi
Navidad	1	2	706	2.34 hi
Zaragoza	2	2	748	2.13 hij
Zaragoza	1	1	706	1.71 ijk
Zaragoza	1	2	748	1.69 ijk
Navidad	3	3	706	1.41 jkl
Navidad	2	2	Cirno	1.24 jklm
Zaragoza	3	3	Cirno	1.18 klmn
Zaragoza	3	2	748	1.06 klmno
Zaragoza	1	3	Cirno	1.00 klmnop
Zaragoza	3	3	706	0.95 klmnopq
Navidad	2	2	706	0.85 klmnopq
Zaragoza	3	3	748	0.75 lmnopq
Navidad	1	1	748	0.73 lmnopq
Zaragoza	3	1	748	0.69 lmnopq
Zaragoza	2	2	Cirno	0.66 lmnopq
Navidad	2	1	748	0.63 lmnopq
Navidad	1	1	Cirno	0.60 lmnopq
Navidad	2	2	748	0.55 lmnopq

Navidad	1	1	706	0.38 mnopq
Navidad	3	2	706	0.36 mnopq
Navidad	2	1	706	0.35 mnopq
Zaragoza	3	1	706	0.30 nopq
Navidad	3	1	706	0.29 nopq
Zaragoza	2	1	748	0.25 opq
Zaragoza	2	1	706	0.25 opq
Zaragoza	3	1	Cirno	0.24 opq
Zaragoza	3	2	706	0.23 opq
Navidad	3	1	Cirno	0.22 opq
Zaragoza	3	2	Cirno	0.18 opq
Zaragoza	2	3	706	0.18 opq
Navidad	3	2	748	0.17 opq
Navidad	2	1	Cirno	0.15 opq
Zaragoza	2	1	Cirno	0.13 pq
Zaragoza	2	3	748	0.10 pq
Zaragoza	2	3	Cirno	0.09 pq
Zaragoza	1	1	Cirno	0.09 pq
Zaragoza	1	1	748	0.07 q
Navidad	3	2	Cirno	0.05 q
Navidad	3	1	748	0.05 q
Media				2.07
Tukey				0.92

Fertilización (kg N ha⁻¹): niveles 1 (260), 2 (130) y 3 (32). Riego: niveles 1 (alto), 2 (medio) y 3 (bajo). Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0.05$).

4.2.5. Análisis de comparación de medias para peso de mil semillas y peso hectolítrico

Respecto a PMS (Figura 6A), el mayor valor se registró bajo el nivel de riego alto (44.5 g), significativamente superior a los niveles de riego medio (41.0 g) y bajo (40.7 g), que no difirieron entre sí. En cuanto a PHL, el riego alto también presentó el valor más alto (76.89 kg hl⁻¹), seguido del riego bajo (76.25 kg hl⁻¹) y riego medio (75.86 kg hl⁻¹), con diferencias estadísticas entre ellos (Figura 7A).

En el caso de la fertilización, el nivel bajo promovió el mayor PMS (43.16 g) y PHL (77.79 kg hl⁻¹), significativamente superiores a los de los niveles 1 y 2 (Figuras 4A y 5A). El nivel 1 presentó el PMS más bajo (40.38 g) y el menor PHL (75.12 kg hl⁻¹), lo cual indica una respuesta positiva de estos parámetros físicos del grano con relación a niveles bajos de fertilización (Figura 7A). En un estudio de Mon *et al.* (2016) reportaron que el peso de semilla en trigo cristalino respondió positivamente al nivel de riego en dos temporadas de cultivo obteniendo un promedio de 55 g en la primera y 51 g en la segunda, además observaron que los efectos de las dosis de nitrógeno fueron más generalizados en los distintos niveles de riego.

Por otro lado, el análisis por genotipo mostró que el material 706 obtuvo el mayor PMS (46.6 g) y un PHL de 76.81 kg hl⁻¹ (Figuras 6B y 7B), estadísticamente similares a los del testigo Cirno (76.50 kg hl⁻¹), aunque este último mostró un PMS menor (42.29 g). El genotipo 748 presentó los valores más bajos tanto en PMS (37.25 g) como en PHL (75.69 kg hl⁻¹), siendo significativamente inferior a los otros dos materiales. No obstante, de acuerdo con la normatividad mexicana los resultados de PHL estuvieron dentro de los parámetros que exige la NOM-FF-36-1984 donde se establece que un PHL de 71 kg hl⁻¹ no se deduce y un valor de hasta 77 kg hl⁻¹ no se bonifica (DOF, 1984).

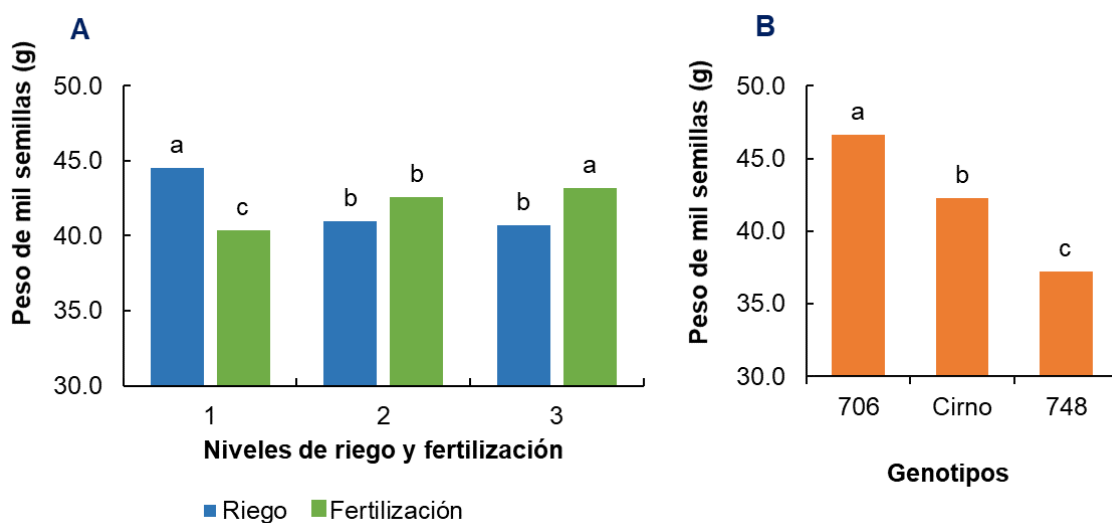


Figura 6. Efecto del riego, la fertilización (A) y el genotipo (B) sobre los valores medios del peso mil de semillas en trigo cristalino.

Fertilización (kg N ha⁻¹): niveles 1 (260), 2 (130) y 3 (32). Riego: niveles 1 (alto), 2 (medio) y 3 (bajo). Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0.05$).

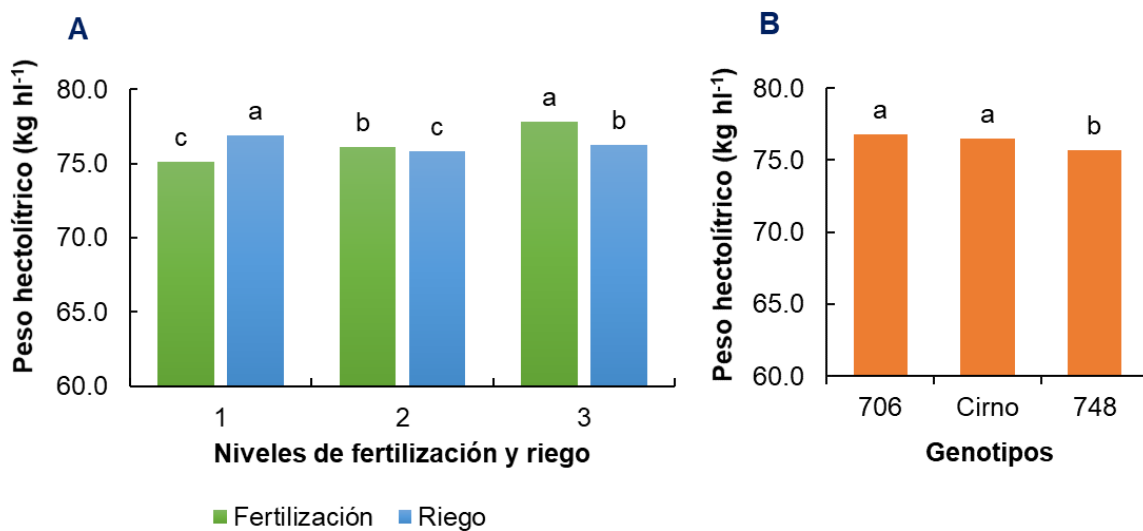


Figura 7. Efecto del riego, la fertilización (A) y el genotipo (B) sobre los valores medios del peso hectolítrico en trigo cristalino.

Fertilización (kg N ha⁻¹): niveles 1 (260), 2 (130) y 3 (32). Riego: niveles 1 (alto), 2 (medio) y 3 (bajo). Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0.05$).

Estos resultados reflejan una influencia importante del manejo del riego y la fertilización, así como del material genético, en la calidad física del grano de trigo. En este contexto, el PHL y el PMS son considerados como indicadores clave de la calidad física, ya que están estrechamente relacionados con el manejo agronómico y las condiciones climáticas prevalecientes durante el desarrollo del cultivo y que finalmente se reflejan en la calidad de la semilla (Fernández *et al.*, 2015).

Generalmente, los granos cosechados bajo condiciones de riego tienden a presentar valores aproximados de peso hectolítrico de alrededor de 82 kg hl⁻¹, en comparación con aquellos provenientes de cultivos sometidos a estrés hídrico, los cuales suelen mostrar características de grano chupado o dañado por sequía (Olán *et al.*, 2012). Por lo tanto, la disponibilidad de agua durante el ciclo del cultivo influye directamente en el desarrollo y la densidad del grano.

4.3. Análisis de correlación

Se realizó un análisis de correlación de Pearson para evaluar las asociaciones entre las variables: rendimiento, peso de mil semillas (PMS), peso hectolítrico (PHL), parámetros de color (valor L, a y b) y la incidencia de panza blanca (PB). Los resultados revelaron una correlación positiva significativa entre PB y PHL ($r = 0.72$), lo cual indica que, a mayor densidad del grano, se incrementa la presencia de este carácter. Asimismo, PB mostró una correlación significativa con el valor a ($r = 0.98$), es decir, una fuerte asociación entre el componente rojo del color y la presencia de PB, y una correlación positiva moderada con el valor b ($r = 0.40$) y el valor L (0.37), reflejando cambios en la tonalidad del grano.

De igual manera, se observó una correlación positiva significativa entre PMS y PHL ($r = 0.65$), indicando que a mayor peso de semilla tiende a presentar una mayor densidad. Adicionalmente, se observó una correlación positiva, aunque no significativa entre PHL y el valor b ($r = 0.61$), señalando que el incremento en el componente amarillo del grano se relaciona con una mayor densidad del grano. El PMS también se correlacionó negativamente de forma significativa con los valores

L ($r = -0.61$) y a ($r = -0.66$), lo cual indica que a medida que el peso de las semillas aumenta, disminuye la luminosidad del grano y su intensidad en el componente rojo. En cuanto a los parámetros de color, se identificó una correlación altamente significativa entre el valor L y el valor a ($r = 0.96$), lo que refleja una fuerte asociación entre la luminosidad y la intensidad del color rojo del grano.

Por otro lado, aunque se observó una correlación moderada entre el rendimiento y PB ($r = 0.52$), es decir, a mayor rendimiento podría asociarse con mayor contenido de panza blanca, sin embargo, no se puede aseverar ya que no fue estadísticamente significativa. Al respecto se podría decir que un alto rendimiento refleja, en gran medida, el contenido de almidón del grano, ya que este componente representa aproximadamente el 80 % de su peso. En este sentido, a medida que aumenta el rendimiento, también lo hace la concentración de almidón (Lovegrove *et al.*, 2020). Por lo tanto, es posible considerar que la presencia de PB no afecta significativamente el rendimiento del cultivo (Ibarra *et al.*, 2023).

El resto de las asociaciones entre las variables no exhibieron correlaciones significativas, indicando una débil o nula relación lineal entre ellas dentro del rango de datos evaluado.

Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de rendimiento y calidad física del grano de trigo cristalino.

Variables	PMS	PHL	Valores de coloración			PB
	(g)	(kg hl ⁻¹)	Valor L	Valor a	Valor b	(%)
Rendimiento (t ha ⁻¹)	0.26	0.45	0.45	0.37	0.35	0.52
PMS		0.65*	-0.61*	-0.66*	-0.51	0.27
PHL			-0.36	-0.33	0.61*	0.72*
Valor L				0.96*	0.19	0.37
Valor a					0.13	0.98*
Valor b						0.40

PMS = peso de mil semillas, PHL = peso hectolítrico, PB = panza blanca. * = $p \leq 0.05$.

5. CONCLUSIONES

La combinación de condiciones favorables, como riego alto en Zaragoza, Coah., resultó en el mayor rendimiento (4.0 t ha^{-1}), mientras que, en Navidad, N.L. con fertilización y riego bajos generaron los menores rendimientos ($< 2.0 \text{ t ha}^{-1}$). Esto destaca la importancia de una adecuada disponibilidad hídrica y su interacción con el nitrógeno.

Respecto a la calidad de grano, el genotipo 748 destacó por mayor luminosidad y amarillez, pero también fue el más susceptible a panza blanca (PB), especialmente bajo riego alto y baja fertilización en Navidad, N.L. En contraste, el genotipo 706 presentó menor incidencia de PB. El manejo con fertilización alta y riego medio contribuyó a reducir la incidencia de PB.

PMS y PHL aumentaron con riego alto, pero también respondieron favorablemente a niveles bajos de fertilización, de manera que, es posible que a dosis moderadas se puedan optimizar estas variables.

Se identificaron asociaciones positivas entre PB y el componente rojo (valor a), así como con PHL. Aunque la correlación entre PB y rendimiento no fue significativa, por lo que se requieren más estudios al respecto. Así también se observó una relación positiva entre PMS y PHL, y entre luminosidad y color rojo, parámetros importantes en la calidad industrial del grano.

En conjunto, se concluye que un manejo agronómico equilibrado, adaptado a las condiciones locales y a la selección de genotipos, es esencial para maximizar el rendimiento y preservar la calidad física del grano, especialmente en lo referente a panza blanca. Estos hallazgos aportan información valiosa para continuar investigando y desarrollando estrategias agronómicas que permitan mejorar simultáneamente la productividad y la calidad física del grano de trigo cristalino.

REFERENCIAS

- Assefa, A., Derebe, B., Gebrie, N., Shibabaw, A., Getahun, W., Beshir, O., & Worku, A. (2023). Grain yield and quality responses of durum wheat (*Triticum turgium* L. var. *durum*) to nitrogen and phosphorus rate in Yilmana Densa, Northwestern Ethiopia. *Heliyon*, 9(7).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17262>
- Carranza-González, S., Carballo-Carballo, A., Villaseñor-Mir, H. E., Hernández-Livera, A., & Ramírez, M.E. (2022). Calidad física de semilla en 24 variedades mejoradas de trigo liberadas en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13(5), 827–840.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v13i5.3003>
- Chávez Villalba, G., Camacho Casas, M. A., Figueroa López, P., Fuentes Dávila, G., Félix Fuentes, J. L., & Villa Aragón, B. A. (2015). Baroyeca Oro C2013: nueva variedad de trigo duro para su cultivo en el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 421–425.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v6n2/v6n2a17.pdf>
- DOF. (1984). Norma Oficial Mexicana NOM-FF-36-1984 Productos alimenticios no industrializados para uso humano cereales- trigo. (*Triticum aestivum* y *T. durum*). Especificaciones (Esta norma cancela la NOM-FF-36-1982). Diario Oficial de La Federación.
https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4660099&fecha=23/03/1984&print=true
- Fernández Sosa, R., Carballo Carballo, A., Villaseñor Mir, H. E., & Livera Hernández, A. (2015). Calidad de la semilla de trigo de temporal en función del ambiente de producción. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 1239–1251.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v6n6/v6n6a8.pdf>
- Ficco, D. B. M., Mastrangelo, A. M., Trono, D., Borrelli, G. M., De Vita, P., Fares, C., Beleggia, R., Platani, C., & Papa, R. (2014). The colours of durum wheat: A review. *Crop and Pasture Science*, 65(1), 1–15.
<https://doi.org/10.1071/CP13293>

- Grahmann, K., Verhulst, N., Peña, R. J., Buerkert, A., Vargas-Rojas, L., & Govaerts, B. (2014). Durum wheat (*Triticum durum* L.) quality and yield as affected by tillage-straw management and nitrogen fertilization practice under furrow-irrigated conditions. *Field Crops Research*, 164(1), 166–177.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.05.002>
- Graziano, S., Marando, S., Prandi, B., Boukid, F., Marmioli, N., Francia, E., Pecchioni, N., Sforza, S., Visioli, G., & Gulli, M. (2019). Technological quality and nutritional value of two durum wheat varieties depend on both genetic and environmental factors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(8), 2384–2395.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b06621>
- Hablemos del campo. (2025). Después de 25 años, México importará trigo cristalino por baja producción nacional. Hablemos Del Campo MX. Recuperado el 05 de junio de 2025 de:
<https://hablemosdelcampo.com.mx/despues-de-25-anos-mexico-importara-trigo-cristalino-por-baja-produccion-nacional/>
- Hare, R. (2017). Durum wheat: Grain-quality characteristics and management of quality requirements. In *Cereal Grains: Assessing and Managing Quality: Second Edition*. Elsevier Inc. 135-151.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100719-8.00006-1>
- Ibarra-Villarreal, A. L., Villarreal-Delgado, M. F., Parra-Cota, F. I., Yepez, E. A., Guzmán, C., Gutierrez-Coronado, M. A., Valdez, L. C., Saint-Pierre, C., & Santos-Villalobos, S. de L. (2023). Effect of a native bacterial consortium on growth, yield, and grain quality of durum wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum*) under different nitrogen rates in the Yaqui Valley, Mexico. *Plant Signaling and Behavior*, 18(1).
<https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2219837>
- INIFAP. (2024). Trigo cristalino con alto contenido de proteína y rendimiento de grano. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Recuperado el 7 de junio de 2025 de:

<https://www.gob.mx/inifap/articulos/trigo-cristalino-con-alto-contenido-de-proteina-y-rendimiento-de-grano?state=published>

ISTA. (2018). Introduction to the ISTA rules Chapters 1–19. *International Rules for Seed Testing*, 2018(1), 1–298.

<https://doi.org/10.15258/istarules.2018.f>

Khalid, A., Hameed, A., & Tahir, M. F. (2023). Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. *Frontiers in Nutrition* 10(10).

<https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1053196>

Ledesma Ramírez, L., Solís Moya, E., Suaste Franco, M. del P., & Rodríguez García, M. F. (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.

<https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v1n1/v1n1a6.pdf>

Lovegrove, A., Pellny, T. K., Hassall, K. L., Plummer, A., Wood, A., Bellisai, A., Przewieslik-Allen, A., BurrIDGE, A. J., Ward, J. L., & Shewry, P. R. (2020). Historical changes in the contents and compositions of fiber components and polar metabolites in white wheat flour. *Scientific Reports*, 10(1).

<https://doi.org/10.1038/s41598-020-62777-3>

Martín-Diana, A. B., García-Casas, M. J., Martínez-Villaluenga, C., Frías, J., Peñas, E., & Rico, D. (2021). Wheat and oat brans as sources of polyphenol compounds for development of antioxidant nutraceutical ingredients. *Foods*, 10(1), 1–21.

<https://doi.org/10.3390/foods10010115>

Meng, F., Zhao, L., Li, W., & Zhao, C. (2024). Optimizing nitrogen application for enhanced yield and quality of strong-gluten wheat: A case study of Zhongmai 578 in the North China Plain. *Agronomy*, 14(6).

<https://doi.org/10.3390/agronomy14061301>

Mon, J., Bronson, K. F., Hunsaker, D. J., Thorp, K. R., White, J. W., & French, A. N. (2016). Interactive effects of nitrogen fertilization and irrigation on grain yield,

- canopy temperature, and nitrogen use efficiency in overhead sprinkler-irrigated durum wheat. *Field Crops Research*, 191, 54–65.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.011>
- Moya, E., & Díaz De León, J. G. (2001). Effect of controllable production factors on grain yield and yellow belly in durum wheat. *TERRA Latinoamericana*, 19, 375–383.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57319410>
- Muhammad, S., & Khan Tanveer, S. (2018). Effect of nitrogen fertilizer application methods on wheat yield and quality. *Science, Technology and Development*, 37(2), 89–92.
<https://doi.org/10.3923/std.2018.89.92>
- Olán, M. de la O., Espitia Rangel, E., López Sánchez, H., Villaseñor Mir, H. E., Peña Bautista, R. J., & Herrera Hernández, J. (2012). Calidad física de grano de trigos harineros (*Triticum aestivum* L.) mexicanos de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(2), 271–283.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v3n2/v3n2a5.pdf>
- Ramírez-Wong, B., Rodríguez-Félix, F., Torres-Chávez, P. I., Medina-Rodríguez, C. L., Matus-Barba, E. A., & Ledesma-Osuna, A. I. (2014). Effects of nitrogen and irrigation on gluten protein composition and their relationship to “yellow berry” disorder in wheat (*Triticum aestivum*). *Pakistan Journal of Botany*, 46(5).
<https://www.researchgate.net/publication/267028751>
- Rodríguez, R. E., Ponce, J. F., Rueda, E. O., Avendaño, L., Paz, J. J., Santillano, J., & Cruz, M. (2011). Genotype-environment interaction to the yield stability in wheat in Mexicali, B.C. México Region. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 543–558.
<https://www.researchgate.net/publication/262592868>
- Rodríguez-González, R. E., Paz Hernández, J. J., Iñiguez Monroy, C. G., Rueda Puente, E. O., Avendaño-Reyes, L., Cruz-Villegas, M., Ail-Catzim, C. E., Stoycheva, M., Koytchev Zlatev, R., Renganathan, P., & García López, A. M. (2014). Yield stability of wheat in the Mexicali Valley, México. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 83, 65–70.

<https://doi.org/10.32604/phyton.2014.83.065>

Romero Baranzini, A. L., Falcón Villa, M. del R., Barrón Hoyos, J. M., Silveira Gramont, M. I., & Alfaro Rodríguez, R. H. (2010). Evaluación de color de garbanzo (*Cicer arietinum* L.) por métodos instrumentales y sensoriales. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 27, 323–335.

<https://www.redalyc.org/pdf/141/14114743005.pdf>

Ruíz-Vega, T. de J., Cortés-Jiménez, J. M., & Fuentes-Dávila, G. (2009). Effect of yellow berry on wheat seed emergence at three sowing depths. In W. J. Raupp & B. F. Carver (Eds.), Annual wheat newsletter. *Kansas State University*, 132-133.

<https://core.ac.uk/download/5177469.pdf>

SAGARPA. (2017). Planeación Agrícola Nacional: Trigo Grano Cristalino y Harinero Mexicano. Recuperado el 20 de mayo de 2025 de:

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256434/B_sico-Trigo_Cristalino_y_Harinero.pdf

Sánchez-Cruz, M. G., Zamora-Villa, V. M., Torres-Tapia, M. A., Colín-Rico, M., & Lozano del Río, A. J. (2022). Agrupamiento de trigos mediante sensores infrarrojos y fracciones de forraje en tres muestreos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(1), 65–76.

<https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2379>

Serranti, S., Cesare, D., & Bonifazi, G. (2013). The development of a hyperspectral imaging method for the detection of Fusarium-damaged, yellow berry and vitreous Italian durum wheat kernels. *Biosystems Engineering*, 115(1), 20–30.

<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.01.011>

SIAP. (2024). Escenario mensual de productos agroalimentarios: Trigo cristalino. Recuperado el 28 de abril de 2025 de:

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/962329/Trigo_cristalino_Nov24.pdf

Taranto, F., Esposito, S., Fania, F., Sica, R., Marzario, S., Logozzo, G., Gioia, T., & De Vita, P. (2023). Breeding effects on durum wheat traits detected using

- GWAS and haplotype block analysis. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1206517>
- Torres-Cruz, M. M., Félix-Valencia, P., & Fuentes-Dávila, G. (2022). Leaf area index and grain yield of durum wheat in southern Sonora, Mexico, during the season 2020-2021. *International Journal of Agriculture, Environment and BioResearch*, 07(06), 253–268. <https://doi.org/10.35410/ijaeb.2022.5788>
- Verhulst, N., Sayre, K., & Govaerts, B. (2012). Manual determinación de rendimiento. *CIMMYT*, 1–37. Recuperado el 12 de mayo de 2025 de: <https://idp.cimmyt.org/publicacion/manual-del-determinacion-de-rendimiento/>
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14, 415–421. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
- Zárate Márquez, A., Ponce Medina, J. F., Partida Ruvalcaba, L., Ayala Tafoya, F., Yáñez Juárez, M. G., Velázquez Alcaraz, T. de J., & Medina López, R. (2015). Greenness, plant height and yellow berry of the wheat grain in response to paclobutrazol. *Open Access Library Journal*, 02(06), 1–7. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101581>
- Zingale, S., Spina, A., Ingraio, C., Fallico, B., Timpanaro, G., Anastasi, U., & Guarnaccia, P. (2023). Factors Affecting the Nutritional, Health, and Technological Quality of Durum Wheat for Pasta-Making: A Systematic Literature Review. *Plants* 12(3). <https://doi.org/10.3390/plants12030530>