



AVANCE GENÉTICO EN EL RENDIMIENTO DE GRANO Y CARACTERES  
ASOCIADOS EN VARIETADES FORRAJERAS DE TRITICALE GENERADAS  
POR LA UAAAN: 1992-2022.

Tesis

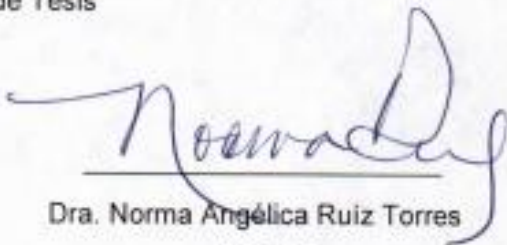
Que presenta DIANA LAURA VIZCARRA MANRÍQUEZ como requisito parcial  
para obtener el grado de Maestro En Ciencias En Fitomejoramiento con la  
supervisión y la aprobación del Comité de Asesoría

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alejandro Javier Lozano del Rio

Director de Tesis

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Luis Velasco López

Asesor

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Norma Angélica Ruiz Torres

Asesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Carlos Javier Lozano Cavazos

Asesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Antonio Flores Naveda

Asesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Antonio Flores Naveda

Subdirector de Postgrado

UAAAN

Saltillo, Coahuila

Octubre 2025

## **AGRADECIMIENTOS**

**A Dios.** Por ser mi guía y fortaleza en cada etapa de este camino. Por darme la vida, la salud y la sabiduría necesarias para alcanzar esta meta, así como la perseverancia para superar los momentos de dificultad. Sin Su bendición y dirección, este logro no habría sido posible.

**A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.** Por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de formarme académicamente en un ambiente de excelencia. Gracias a sus programas de posgrado, a sus profesores y a los recursos puestos a mi disposición, fue posible el desarrollo de esta investigación y el fortalecimiento de mis conocimientos y habilidades en el área del fitomejoramiento.

**A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).** Por el apoyo brindado a través de la beca otorgada durante mis estudios de posgrado. Su respaldo fue fundamental para dedicarme plenamente a mi formación académica y al desarrollo de esta investigación, contribuyendo así a mi crecimiento profesional y personal.

**Al Dr. Alejandro Javier Lozano del Río.** Por su valiosa asesoría, orientación y paciencia a lo largo del desarrollo de esta tesis. Su experiencia, disposición y compromiso fueron esenciales para enriquecer mi formación académica y para llevar este trabajo a buen término. Su guía no solo aportó a mi investigación, sino también a mi crecimiento profesional y personal.

**A mi comité de asesoría.** Integrado por la Dra. Norma Ruíz, el Dr. José Luis Velasco, el Dr. Carlos Javier Lozano y el Dr. Antonio Flores Naveda. Agradezco por el tiempo, la dedicación y las valiosas observaciones que enriquecieron el desarrollo de esta tesis. Sus sugerencias, conocimientos y acompañamiento fueron fundamentales para fortalecer la calidad académica de este trabajo y para mi formación como profesionista e investigadora.

## DEDICATORIA

**A mis padres.** Marcos Ulises Vizcarra y Beatriz Manríquez. Gracias infinitas por su amor, apoyo incondicional y guía a lo largo de toda mi vida y en cada etapa de este proceso. Cada logro que celebro lleva consigo su esfuerzo, enseñanza y sacrificio. Todo esto es por y para ustedes, y mi corazón siempre estará lleno de gratitud y amor hacia ustedes. Los amo profundamente.

**A mis hermanos.** Marco Vizcarra, Valeria Vizcarra y Valentina Vizcarra. Soy la más afortunada por tenerlos como hermanos, son mi mayor ejemplo, gracias por siempre estar para mí, los amo.

**A mis abuelos.** Heriberto Manríquez y María del Carmen Flores. Con profundo cariño agradezco su amor, ejemplo y apoyo incondicional, que han sido una inspiración constante en mi vida.

**A mi cuñada y sobrinas.** Carolina Moran, Jennifer Vizcarra y Odette Vizcarra. Gracias por hacerme su tía, las quiero con todo mi corazón.

**A mis ángeles en el cielo.** Teodoro Vizcarra y Zahir Vizcarra. Con profundo amor y gratitud dedico este trabajo a la memoria de mi abuelo y de mi hermano, quienes, aunque ya no están físicamente, permanecen presentes en mi corazón y han sido una fuente de fortaleza e inspiración para alcanzar esta meta.

**A Víctor Adrián González.** Por tu amor, paciencia y apoyo incondicional en cada etapa de este proceso. Tu compañía constante, tus palabras de aliento y tu confianza en mí me brindaron la fuerza y la motivación necesarias para superar los desafíos y alcanzar esta meta. Gracias por estar siempre a mi lado, por celebrar mis logros y sostenerme en los momentos difíciles. Te amo y este logro también es fruto de tu amor y compromiso.

**A mis amigos.** Nitzya Aroche, Luis Lemus, Omar López, Yoloxóchitl Guerrero, y Yadira Villegas. Por su apoyo, compañía y ánimo constante a lo largo de este camino. Su amistad hizo más llevadero cada desafío y celebró conmigo cada logro.

## ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos .....	ii
dedicatoria .....	iv
RESUMEN .....	viii
RESUMEN .....	ix
ABSTRACT .....	xi
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....	4
Objetivos.....	4
Hipótesis.....	4
REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
Antecedentes, origen y desarrollo .....	5
Principales usos y beneficios en la agricultura .....	5
Impacto en la agricultura mexicana .....	7
Avance genético en cereales.....	7
Rendimiento de grano y características asociadas.....	8
Contribución de la UAAAN .....	10
MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
Material genético .....	12
Localidades de estudio .....	13
Diseño experimental .....	13
Fertilización .....	13
Riegos .....	13
Control de plagas, enfermedades y malezas.....	13
Variables agronómicas evaluadas.....	14
Análisis estadísticos .....	15
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	17
Regresiones lineales .....	28
CONCLUSIONES .....	36
REFERENCIAS .....	37

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Serie histórica de las variedades forrajeras liberadas por la UAAAN. ....	12
Cuadro 2. Época de liberación de las variedades de hábito invernal liberadas por la UAAAN.....	12
Cuadro 3. Resultados y significancia del análisis de varianza combinado entre localidades y épocas para la variable rendimiento de grano (RDTOG), ciclos 2019 al 2023 .....	17
Cuadro 4. Resultados de la prueba de comparación de medias para el factor localidades (LOC) de la variable rendimiento de grano (RENDG). ....	19
Cuadro 5. Resultados de la prueba de comparación de medias de la variable rendimiento para el factor época de liberación. ....	20
Cuadro 6. Resultados de los análisis de varianza para los componentes de rendimiento de 7 variedades de triticale agrupadas por época de liberación. Ciclo otoño-invierno 2023-2024 .....	22
Cuadro 7. Prueba de comparación de medias del factor localidad, para las variables componentes de rendimiento. ....	23
Cuadro 8. Prueba de comparación de medias de los componentes de rendimiento entre épocas de liberación. Ciclo 2022-2023. ....	24
Cuadro 9. Resultados del análisis de varianza entre localidades y épocas para la variable altura de planta (ALT), ciclo 2022-2023.....	26
Cuadro 10. Resultados de la prueba de comparación de medias entre épocas para la variable altura de planta (ALT).....	26
Cuadro 11. Resultados de los análisis de varianza de la regresión lineal simple entre la época de liberación de las variedades y las variables estudiadas. ....	28
Cuadro 12. Ganancias genéticas absolutas por año para el rendimiento de grano (RENDG) y sus componentes de las variedades en estudio de acuerdo a su época de liberación.....	30
Cuadro 13. Ganancias genéticas relativas (%) por año para el rendimiento de grano (RENDG) y sus componentes de las variedades en estudio de acuerdo a su época de liberación. ....	30

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre el rendimiento de grano y la época de liberación de las variedades de triticales generadas por la UAAAN. 1992-2022. ....	29
Figura 2. Relación entre el número de espigas por metro cuadrado y la época de liberación de las variedades generadas por la UAAAN.1992-2022. ....	32
Figura 3. Relación entre el número de granos por espiga y la época de liberación de las variedades de triticales generadas por la UAAAN.1992-2022. ....	33
.....	33
Figura 4. Relación entre el número de granos por metro cuadrado y el año de liberación de las variedades de triticales generadas por la UAAAN.1992-2022. ....	33
Figura 5. Relación entre la altura de planta y el año de liberación de las variedades de hábito invernal, generadas por la UAAAN en el periodo de 1992-2022. ....	34

## RESUMEN

AVANCE GENÉTICO EN EL RENDIMIENTO DE GRANO Y CARACTERES  
ASOCIADOS EN VARIEDADES FORRAJERAS DE TRITICALE GENERADAS  
POR LA UAAAN: 1992-2022.

POR

DIANA LAURA VIZCARRA MANRÍQUEZ

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ALEJANDRO JAVIER LOZANO DEL RÍO -ASESOR-

Saltillo, Coahuila

Octubre 2025

## RESUMEN

Esta investigación analizó el progreso genético en el rendimiento de grano y en diversos atributos agronómicos de siete variedades forrajeras de triticale (X Triticosecale Wittmack) de hábito invernal, desarrolladas y liberadas por la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) durante el periodo de 1992 a 2022. Las variedades se clasificaron en tres grupos, según su época de liberación (antiguas, intermedias y modernas) y fueron evaluadas en 19 localidades del norte de México entre 2019 y 2023, bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se midieron las siguientes variables: rendimiento de grano, espigas por metro cuadrado, número de granos por espiga, granos por metro cuadrado y altura de planta. Los análisis de varianza y regresión lineal mostraron efectos positivos y altamente significativos de la época de liberación sobre el rendimiento de grano y sus componentes (modernas vs antiguas, modernas vs intermedias e intermedias vs antiguas), con ganancias genéticas absolutas de 70, 236 y 9.5 kg ha<sup>-1</sup> por año, respectivamente, debido a mejoras notables en el número de espigas por m<sup>2</sup>, en la fertilidad de espiga y en la densidad de granos por unidad de superficie. Como resultado, las variedades modernas registraron un rendimiento de grano significativamente mayor que las intermedias y antiguas, registrando un promedio de 6.105 t ha, frente a 4.223 y 3.914 t ha, respectivamente. Asimismo, se observó una reducción progresiva en la altura de planta, sin menoscabo en la producción de biomasa, favoreciendo la estabilidad y el potencial productivo. Estos resultados confirman el progreso genético sostenido en el programa de mejoramiento genético de triticale de la UAAAN, con impactos positivos en la productividad relacionada con el rendimiento de grano y en la adaptación de las variedades evaluadas a los actuales sistemas de producción de este cultivo.

**Palabras clave:** triticale, ganancia genética, rendimiento de grano, componentes de rendimiento, mejoramiento genético.

**ABSTRACT**

**GENETIC ADVANCEMENT IN GRAIN YIELD AND ASSOCIATED  
TRAITS IN TRITICALE FORAGE VARIETIES GENERATED BY  
UAAAN: 1992-2022.**

**BY**

**DIANA LAURA VIZCARRA MANRÍQUEZ**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DR. ALEJANDRO JAVIER LOZANO DEL RIO -ASESOR-**

**Saltillo, Coahuila**

**Octubre 2025**

## ABSTRACT

This research analyzed the genetic progress in grain yield and several agronomic traits of seven forage triticale (*X Triticosecale* Wittmack) winter-type varieties, developed and released by the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) between 1992 and 2022. The varieties were classified into three groups according to their release date (old, intermediate, and modern) and were evaluated in 19 locations in northern Mexico between 2019 and 2023, under a completely randomized block design with three replicates. The following variables were measured: grain yield, ears per square meter, number of grains per ear, grains per square meter, and plant height. Analysis of variance and linear regression showed positive and highly significant effects of release date on grain yield and its components (modern vs. old, modern vs. intermediate, and intermediate vs. old), with absolute genetic gains of 70, 236, and 9.5 kg ha<sup>-1</sup> per year, respectively, due to notable improvements in the number of ears per m<sup>2</sup>, ear fertility, and grain density per unit area. As a result, modern varieties recorded significantly higher grain yields than intermediate and old varieties, averaging 6.105 t ha, compared to 4.223 and 3.914 t ha, respectively. Likewise, a progressive reduction in plant height was observed, without compromising biomass production, favoring stability and productive potential. These results confirm the sustained genetic progress in the UAAAN's triticale breeding program, with positive impacts on productivity related to grain yield and on the adaptation of the evaluated varieties to current production systems for this crop.

**Keywords:** triticale, genetic gain, grain yield, yield components, genetic improvement.

## INTRODUCCIÓN

Los cereales constituyen un grupo de cultivos fundamentales con aplicaciones nutricionales tanto para seres humanos como para el ganado a nivel global y nacional, además de contar con aplicaciones forrajeras. El crecimiento continuo de la población y el desarrollo económico de los sistemas de comercio han sido factores determinantes que han incrementado la demanda de cultivos más productivos, resistentes y con mejor adaptación. En México, y específicamente en la UAAAN, esta circunstancia ha hecho que el mejoramiento genético del triticale, inicialmente centrado en su valor forrajero, responda simultáneamente a exigencias con respecto a la producción de semilla de alta calidad con mayor rendimiento, calidad, estabilidad y adaptación a diferentes condiciones agroclimáticas. En base a estos retos, el proceso de mejoramiento se ha mantenido dinámico gracias a la incorporación de nuevas herramientas tecnológicas, criterios de selección más precisos y una comprensión más profunda de la genética del cultivo, lo que ha permitido avances sostenidos a lo largo del tiempo (Stoyanov y Baychev, 2023).

El triticale (*x Triticosecale* Wittmack) es el resultado de la cruce entre trigo y centeno. Es un híbrido anfidiplóide, es decir, posee un conjunto diploide de cromosomas de las dos especies progenitoras, combinando sus genomas completos en un solo organismo (Mergoum, *et al.*, 2009).

Las investigaciones sobre el triticale se remontan a más de un siglo; en sus primeras etapas, este cultivo enfrentó múltiples desafíos: la altura excesiva de las plantas aumentaba la susceptibilidad al acame, presentaba madurez tardía, cierta sensibilidad al fotoperiodo y elevada esterilidad, además de producir semillas con textura arrugada y bajo vigor.

Gracias a los avances en mejoramiento genético, se han logrado resolver gran parte de estos problemas, logrando variedades con altura más adecuada, mayor fertilidad, uniformidad en la madurez, semillas de mejor calidad y mejor adaptación a distintas condiciones ambientales. Estos progresos han consolidado al triticale como un cultivo estable y productivo, con un potencial

creciente destinado a la obtención de grano y de biomasa forrajera, contribuyendo significativamente a la seguridad alimentaria y a la diversificación de los sistemas agrícolas (Jobet, *et al.*, 2019).

Respecto a la producción mundial de grano de triticale, la FAO (2023) reportó un volumen cercano a 14 millones de toneladas, con rendimientos promedio de 3.8 t ha<sup>-1</sup>. Entre los principales países productores se encuentran Polonia, Alemania, Bielorrusia, Francia, España, China, Austria y Hungría, lo que resalta la relevancia de este cereal en regiones que presentan condiciones propicias para su desarrollo.

En México, durante el año 2023, se destinaron un total de 16,397 hectáreas al cultivo de triticale con fines forrajeros. La producción se concentró principalmente en la Región Lagunera, comprendida por los estados de Coahuila y Durango, donde se obtuvieron 104,139 toneladas de triticale destinadas a verdeo. Estos datos reflejan la importancia creciente de este cereal como alternativa forrajera en el país, especialmente en sistemas de producción que buscan eficiencia en la producción de biomasa y disponibilidad de forraje de calidad para la alimentación animal (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP, 2023).

Actualmente, uno de los principales objetivos es desarrollar nuevas variedades forrajeras que presenten buena producción y calidad de grano (semilla). En el programa de mejoramiento genético de triticale de la UAAAN, desde 1992 hasta la fecha, se ha generado diverso germoplasma a partir de nuevos cruzamientos. Este desarrollo ha considerado el hábito de crecimiento de las variedades, clasificándolas como invernales o facultativas, así como características fenológicas clave, incluyendo la etapa de floración, la duración del llenado de grano y la cantidad de días necesarios para alcanzar la madurez fisiológica. La información obtenida ha permitido orientar la elección de genotipos con alto rendimiento y buena adaptación a diversos ambientes de cultivo. Estos criterios, junto con el patrón productivo de forraje, han permitido seleccionar materiales mejor adaptados a distintos ambientes y sistemas de producción, los cuales son utilizados por productores del norte y centro de México. Las primeras variedades

registradas de este cultivo por la UAAAN fueron genotipos con alta producción de forraje, (> 45 toneladas de materia verde por ha), pero con un potencial relativamente bajo de producción de grano, con rendimientos que en promedio no superaban las 2.5 toneladas por ha, aspecto muy importante basado en las expectativas de tipo económico ligadas a la producción de semilla registrada o certificada (relación costo-beneficio). Después de los primeros registros (1992), el enfoque de selección en el programa de mejoramiento ha sido mantener un alto potencial de producción de forraje, aumentando simultáneamente el rendimiento de grano mediante la estrategia de realizar cruces dirigidas entre las líneas superiores forrajeras de hábito invernal con materiales de hábito primaveral o facultativo con alto rendimiento de grano. A este respecto, documentar las características de este cultivo asociadas a la ganancia genética es un paso esencial para identificar los factores limitantes en el aumento del rendimiento y con esta información, diseñar estrategias de mejoramiento genético en el cultivo de triticale.

Las series históricas de genotipos han sido documentadas y utilizadas en diversos países como una herramienta fundamental para evaluar las ganancias genéticas a lo largo del tiempo derivadas de la selección y el mejoramiento. Este enfoque se ha aplicado en cultivos como trigo, maíz, arroz, soya y triticale, permitiendo estimar el progreso genético en características agronómicas clave, como el rendimiento y la adaptación. Para este propósito, se emplean herramientas estadísticas como los análisis de varianza y de regresión lineal, que permiten cuantificar el cambio genético anual y separar los efectos ambientales del genético en los datos obtenidos de ensayos multi-localidad o multianuales (Royo, *et al.*, 2007; Valvo, *et al.*, 2018; Stoyanov y Baychev, 2023). El presente estudio se enfocó en cuantificar la ganancia genética en el rendimiento de grano de las variedades forrajeras de triticale desarrolladas por la UAAAN entre el periodo 1992-2022, así como en identificar las características agronómicas mayormente relacionadas a estas mejoras.

## OBJETIVOS E HIPÓTESIS

### Objetivos

- Evaluar la ganancia genética en el rendimiento de grano en la serie histórica de variedades forrajeras de triticale liberadas por la UAAAN.
- Identificar las características agronómicas asociadas a estos cambios genéticos.

### Hipótesis

H<sub>a</sub>: El mejoramiento genético en las variedades forrajeras de triticale generadas por la UAAAN entre 1992 y 2022 ha resultado en un incremento significativo en el rendimiento de grano, debido a la mejora de características agronómicas asociadas, reflejando ganancias genéticas durante el período antes mencionado.

H<sub>0</sub>: El mejoramiento genético en las variedades forrajeras de triticale generadas por la UAAAN entre 1992 y 2022 no ha resultado en un incremento significativo en el rendimiento de grano, ni se ha observado mejora de las características agronómicas asociadas, sin reflejar ganancias genéticas durante el período antes mencionado.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Antecedentes, origen y desarrollo

El triticale (*x Triticosecale Wittmack*) es un cereal híbrido obtenido a partir de la combinación genética entre el trigo (*Triticum spp.*) y el centeno (*Secale cereale*). Este híbrido fue desarrollado con la finalidad de integrar las cualidades de sus especies progenitoras: el alto rendimiento y calidad del grano del trigo, junto con la tolerancia a bajas temperaturas, resistencia a enfermedades y capacidad de crecer en suelos de baja fertilidad que aporta el centeno. Su creación representa uno de los avances más importantes en el mejoramiento genético de cereales del siglo XX, proporcionando una alternativa agrícola versátil y productiva para sistemas de cultivo que enfrentan condiciones difíciles. (CIMMYT, 2008).

El adelanto más relevante en la mejora del triticale fue en la década de 1930, cuando se logró duplicar el número de cromosomas mediante el uso de colchicina, un compuesto de origen vegetal. Este procedimiento permitió restaurar la fertilidad de los híbridos, incrementando su estabilidad y dando lugar a las primeras variedades fértiles de triticale (Infoagro, 2023).

A partir de entonces, el triticale comenzó a destacarse como un cultivo alternativo en regiones donde otros cereales presentan dificultades. Instituciones como el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) en México han desarrollado variedades comerciales con buena adaptación a distintos climas y capaces de cubrir diversas necesidades agrícolas. Dichas variedades resultan particularmente útiles en zonas de gran altitud, suelos ácidos y periodos de sequía, consolidando al triticale como una opción resistente y productiva para sistemas agrícolas exigentes (INIA, 2022).

### Principales usos y beneficios en la agricultura

En las últimas décadas, el triticale ha adquirido relevancia en la agricultura debido a su versatilidad y los múltiples beneficios que ofrece. Este cereal se caracteriza por su alta producción de biomasa, lo que lo hace especialmente adecuado para

la alimentación del ganado. Diferentes estudios han demostrado que su productividad forrajera y contenido de proteína superan a los de la avena, ya que los rendimientos de forraje henificado y ensilado del triticale exceden a los obtenidos con trigo, centeno, avena y otros cereales, como la cebada. Estas propiedades destacan al triticale como una alternativa eficiente y productiva para sistemas de producción de forraje, contribuyendo a garantizar alimento de calidad para el ganado (Varughese *et al.*, 1987; Mergoum *et al.*, 2009; Upreti *et al.*, 2022).

Además del aprovechamiento de su biomasa, el grano de triticale constituye una opción interesante para la alimentación de cerdos y aves de corral, ya que generalmente supera al trigo en el contenido de lisina y ofrece un perfil más equilibrado de otros aminoácidos esenciales. Diversas investigaciones en nutrición animal indican que el triticale puede ser comparable o incluso superior al trigo como ingrediente principal en dietas para ganado, consolidándose como una alternativa nutritiva capaz de reemplazar otros cereales como maíz, sorgo, cebada y centeno (Varughese *et al.*, 1987).

El triticale también hereda del centeno una destacable tolerancia al frío y a diversas enfermedades, lo que le permite desarrollarse en condiciones adversas donde otros cereales presentan limitaciones. Esta adaptabilidad lo hace adecuado para suelos de baja fertilidad o climas extremos, convirtiéndolo en una opción resistente y productiva para este tipo de sistemas agrícolas (Mendoza-Elos *et al.*, 2011).

Aunque el uso principal del grano ha sido en la alimentación animal, investigaciones recientes han explorado el potencial del triticale para consumo humano. Se han identificado líneas con alto valor nutricional y funcional, destacando su utilidad en la producción de alimentos, especialmente en productos de panificación (Rodríguez-Perez *et al.*, 2023).

El triticale también se caracteriza por su eficiencia en el uso del nitrógeno, lo que permite disminuir la dependencia de fertilizantes químicos y fomentar prácticas agrícolas más sostenibles. Su inclusión en rotaciones de cultivo representa una

estrategia eficaz para diversificar la producción, incrementar la resiliencia de los sistemas agrícolas y aportar beneficios económicos y ambientales (Plana *et al.*, 2016).

En términos generales, el triticale ofrece grano y forraje adicionales, desempeñando un rol esencial en la seguridad alimentaria global. Su versatilidad permite su uso en la alimentación animal y humana, mientras que su capacidad de adaptación a distintas condiciones agroclimáticas y eficiencia en el uso de recursos lo convierten en una opción valiosa para fortalecer la producción agrícola en regiones con limitaciones edafoclimáticas. Así, este cereal no solo contribuye a aumentar la disponibilidad de alimentos, sino que también promueve la sostenibilidad mediante la diversificación de cultivos y la minimización de los efectos ambientales generados por el uso excesivo de agroquímicos (Varughese *et al.*, 1987; Mergoum *et al.*, 2009).

### **Impacto en la agricultura mexicana**

El triticale se ha consolidado como una alternativa agrícola importante en diversas regiones de México, especialmente en zonas semiáridas con disponibilidad limitada de agua, donde se han desarrollado múltiples ensayos para evaluar el comportamiento forrajero de distintas variedades. Los resultados indican que este cultivo puede generar rendimientos competitivos incluso bajo situaciones de sequía y en suelos con baja fertilidad (Velasco *et al.*, 2020). De acuerdo con el CIMMYT (2008), este cereal constituye una opción forrajera atractiva debido a su menor requerimiento hídrico y a que su producción implica menores costos comparados con otros cultivos. Asimismo, presenta una calidad nutritiva adecuada, consolidándose como una alternativa eficaz para mejorar la rentabilidad y sostenibilidad del sector ganadero en México.

### **Avance genético en cereales**

En las últimas décadas, el mejoramiento genético de los cereales ha avanzado de manera notable; específicamente en triticale, se ha puesto énfasis en

incrementar la resistencia a enfermedades, optimizar la calidad tanto nutricional como industrial y mejorar la adaptación frente al cambio climático; este último constituye un obstáculo considerable para su óptima producción, por lo que las investigaciones se han orientado también a desarrollar variedades capaces de tolerar condiciones climáticas adversas, incluyendo períodos de sequía y temperaturas extremas.

### **Ganancia genética en triticale**

Los métodos de mejoramiento genético aplicados al triticale han sido variados y complementarios, combinando estrategias tradicionales y modernas para generar variedades que satisfagan las necesidades actuales de la agricultura. La combinación de estos enfoques ha facilitado el desarrollo de genotipos con mayor rendimiento, adaptabilidad y calidad, fortaleciendo la posición de este cultivo en distintas regiones del mundo. En comparación con el trigo (Royo et al., 2007; Valvo et al., 2018), existe información limitada sobre la ganancia genética en triticale, entendida como el incremento de rendimiento de las variedades modernas frente a las antiguas. En Bulgaria, Stoyanov et al. (2022) y Stoyanov y Baychev (2023) evaluaron los avances en el mejoramiento de triticale analizando variedades hexaploides de hábito invernal liberadas en distintas épocas. Sus estudios evidenciaron mejoras en el rendimiento y la estabilidad, principalmente por aumentos en el número de granos por espiga y el peso de 1000 granos. Asimismo, estos autores destacan que los programas de mejoramiento deben continuar priorizando la estabilidad, la resistencia a enfermedades y la adaptación a condiciones climáticas adversas.

### **Rendimiento de grano y características asociadas**

El rendimiento de grano en triticale es afectado por una combinación de factores genéticos, agronómicos y ambientales. Dentro del contexto agronómico, la elección de la correcta fecha de siembra y densidad de semilla son cruciales para el buen desarrollo del cultivo y, por ende, un mayor rendimiento. Diferentes estudios han logrado demostrar que los factores mencionados afectan la

producción y calidad de la semilla de triticale, influyendo directamente en el rendimiento final (Mendoza-Elos, *et al.*, 2011). Al igual que en otros cereales, el potencial de rendimiento de grano del triticale está determinado por la combinación de características genéticas, el manejo agronómico y las condiciones del ambiente. Una comprensión integral de estos elementos y su adecuada gestión son fundamentales para optimizar la producción de este cereal (Jobet, *et al.*, 2016).

Para evaluar el rendimiento en triticale se utilizan diversos parámetros que permiten determinar su productividad y adaptabilidad en diferentes condiciones agroclimáticas. Este parámetro se mide en toneladas por hectárea ( $t\ ha^{-1}$ ) y refleja la capacidad del cultivo para producir grano bajo condiciones específicas de manejo y ambiente (Velasco, *et al.*, 2020).

Entre las características genéticas que se asocian positivamente con el rendimiento se encuentra el número de espigas por unidad de superficie. Un aumento en el número de espigas suele estar vinculado con una mayor productividad de grano (Royo *et al.*, 2007; Araus *et al.*, 2018). Otra característica relevante es el número de granos por espiga, que indica la fertilidad de las espigas y su capacidad para generar granos. Diversos estudios han mostrado que existe una correlación notablemente favorable entre el número de granos por espiga y el rendimiento total del cultivo (Velasco *et al.*, 2020).

El número de granos por metro cuadrado es un componente fundamental del rendimiento, ya que indica la cantidad total de granos producidos por unidad de superficie. Se obtiene multiplicando el número de espigas por metro cuadrado por el número promedio de granos por espiga. Este parámetro se considera uno de los vitales determinantes de la variación en el rendimiento de los cultivos cerealíferos, al reflejar tanto la capacidad de la planta para formar espigas como la fertilidad de las mismas (Slafer *et al.*, 2014).

Asimismo, el peso de los granos representa un factor que contribuye al rendimiento final. Estudios previos indican una asociación favorable entre esta variable y la producción de grano en triticale, aunque su importancia es inferior a

la de los componentes mencionados anteriormente (Royo *et al.*, 2007). El peso hectolítrico constituye otra variable relevante para la determinación del rendimiento. Esta medida refleja la densidad del grano, sirviendo como un indicador de su calidad comercial. Generalmente, un mayor peso hectolítrico se relaciona con granos de mejor calidad y, por ende, con un valor más elevado en el mercado (Cárdenas, *et al.*, 1998).

Además del rendimiento de grano, el triticale se evalúa por su producción de biomasa, especialmente cuando se utiliza con fines forrajeros. El rendimiento de biomasa seca se mide en toneladas por hectárea y es crucial para determinar su valor como cultivo forrajero (Velasco, *et al.*, 2020).

En base a lo mencionado anteriormente, la evaluación del rendimiento en triticale se basa en una combinación de parámetros que incluyen el rendimiento de grano, sus componentes y la producción de biomasa. Estos parámetros originan una visión integral de la productividad y adaptabilidad del triticale, permitiendo a los investigadores y agricultores seleccionar las variedades más adecuadas para sus necesidades específicas (Berevachk, 2023).

### **Contribución de la UAAAN**

La Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) ha desempeñado un papel fundamental en el mejoramiento genético del triticale en México. Sus esfuerzos se han centrado en desarrollar variedades que optimicen la producción forrajera y se adapten a las necesidades de la ganadería nacional. Desde 1992 al 2022, el Proyecto Triticale del Programa de Cereales, adscrito al Departamento de Fitomejoramiento de la UAAAN, ha registrado 10 variedades de triticale, de las cuales 7 son del tipo invernial y 3 del tipo facultativo. En 2022, se obtuvieron los títulos de obtentor para tres nuevas variedades denominadas AN43, AN330 y AN388. Estas variedades, de tipo invernial, destacan por su excelente capacidad de rebrote, tolerancia a bajas temperaturas y alta producción de forraje de calidad, con un contenido proteico superior al 20%. Estas características las hacen ideales para la alimentación de ganado lechero, mejorando la producción de leche y reduciendo costos al disminuir la necesidad de suplementos proteicos.

Otras variedades con las cuales cuenta la Universidad, son las denominadas AN-34, AN-31, AN-PELÓN, AN-66 y AN-184.

La UAAAN ha realizado no solo evaluaciones agronómicas, sino también estudios sobre la calidad fisiológica del triticale en distintos modelos productivos de la región de La Laguna. Estas investigaciones tienen como objetivo identificar las condiciones óptimas que permitan maximizar el rendimiento y, al mismo tiempo, mejorar la calidad del forraje, contribuyendo así al desarrollo de prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles. En conjunto con el CIMMYT, el programa de mejoramiento genético de triticale de la UAAAN ha realizado aportes significativos al campo del fitomejoramiento de este cultivo en México, desarrollando variedades para satisfacer las necesidades de la ganadería regional y nacional, contribuyendo al fortalecimiento de este sector.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Material genético

Esta investigación incluyó siete variedades de triticale de hábito invernal e intermedio-invernal, pertenecientes a la serie histórica de triticales forrajeros liberados por la UAAAN en el periodo de 1992 a 2022, (Cuadro 1).

Cuadro 1. Serie histórica de las variedades forrajeras liberadas por la UAAAN.

<b>Denominación</b>	<b>Hábito de crecimiento</b>
AN34	Invernal
AN31	Invernal
ANPELÓN	Invernal
AN66	Intermedio-invernal
AN184	Intermedio-invernal
AN330	Intermedio-invernal
AN388	Intermedio-invernal

Las variedades de agruparon por épocas diferentes (modernas, intermedias y antiguas) según su época de liberación, (Cuadro 2).

Cuadro 2. Época de liberación de las variedades de hábito invernal liberadas por la UAAAN.

<b>Modernas</b>		<b>Intermedias</b>		<b>Antiguas</b>	
Variedad	Año	Variedad	Año	Variedad	Año
AN330	2022	ANPELÓN	2014	AN31	1992
AN388	2022	AN66	2014	AN34	1992
		AN184	2014		

### **Localidades de estudio**

Para estimar la ganancia genética en la serie histórica de las variedades de triticale, se utilizaron datos de rendimiento de grano de 19 experimentos de campo realizados del 2020 al 2023 en diferentes localidades del norte de México (Aldama, Chihuahua, Miguel Auza, Zacatecas, Matamoros y San Pedro de las Colonias en la Región Lagunera). Para estimar la ganancia genética en los componentes del rendimiento se utilizaron los datos de tres localidades en la Región Lagunera durante el ciclo 2023-2024.

### **Diseño experimental**

En cada una de las localidades previamente descritas, los siete genotipos fueron evaluados utilizando un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental consistió en cinco surcos de 5 m de longitud, separados a 30 cm, con una superficie total de 7.5 m<sup>2</sup> y una densidad de siembra de 140 kg de semilla por ha.

### **Fertilización**

Se realizó en diferentes etapas del cultivo, en cada una de las localidades de estudio: a la siembra, y durante la etapa de amacollamiento, se aplicó por hectárea la dosis de fertilización 38-0-0 con NitroPerfecto + KBr ® más 11-52-0 (fosfato monoamónico).

### **Riegos**

En cada una de las localidades de evaluación se realizaron un total de 6 riegos, siendo el primer riego pesado, posterior a la siembra y los demás auxiliares. La lámina aproximada para cada riego fue de 10 cm. Las fechas fueron determinadas por el personal encargado en cada localidad.

### **Control de plagas, enfermedades y malezas**

Como medida de prevención se aplicó el fungicida CONSIST MAX® contra la roya de la hoja (*Puccinia recondita R.*) en una dosis de 0.10 l ha<sup>-1</sup> en la etapa posterior al amacollamiento. Las malezas se eliminaron con la aplicación de

GESAPRIM® y LUCAMINA 4® en una dosis de 0.7 l ha<sup>-1</sup>, respectivamente. No hubo incidencia importante de plagas.

### **Variabes agronómicas evaluadas**

En la etapa de madurez fisiológica se midieron las siguientes características:

**Altura (ALT):** se midió en cm desde la base del tallo (superficie del suelo) hasta el extremo distal de la espiga, excluyendo las aristas.

**Espigas por metro cuadrado (ESPM2):** se contaron las espigas en un metro lineal de un surco con competencia completa (0.3 m<sup>2</sup>); el dato se transformó a un m<sup>2</sup>.

En la etapa de madurez a cosecha se midieron las siguientes características:

**Número de granos por espiga (GRAESP):** se contó el total de granos de 10 espigas maduras tomadas al azar y se calculó el promedio.

**Número de granos por metro cuadrado (GRAM2):** se obtuvo multiplicando el número promedio de los granos por espiga por el número promedio de espigas por m<sup>2</sup>.

**Rendimiento de grano (RENDG):** El rendimiento de grano (kg/parcela) se obtuvo cosechando manualmente con rozadera un surco de 5 m de largo con competencia completa (1.5 m<sup>2</sup>) y trillando en una máquina estacionaria tipo Pullman. Posteriormente se realizó la conversión a kg por ha.

### **Cálculo de la ganancia genética**

Esta se estimó para el rendimiento de grano y las variables asociadas con la metodología propuesta por Royo *et al.*, (2007), de la siguiente forma:

**Ganancia genética absoluta (GGA):** se calculó como la diferencia absoluta entre las medias de las variedades en cada época de liberación dividida entre el número de años de diferencia de cada época:

$$GGA = \bar{X}_{modernas} - \bar{X}_{antiguas}/años$$

**Ganancia genética relativa (GGR):** se calculó como la diferencia en porcentaje entre las medias de las variedades en cada época de liberación dividida entre el número de años de diferencia de cada época.

### Análisis estadísticos

#### Rendimiento de grano y componentes

Se realizaron análisis de varianza combinados (SAS, 2004) entre los grupos de variedades correspondientes a cada época de liberación y las localidades de estudio (19 para rendimiento y 3 para los componentes de rendimiento) y sus respectivas pruebas de comparación de medias (Tukey, 0.05). El modelo lineal utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + L_i + (R_j L_i) + G_k + (L_i G_k) + E_{ijkl}$$

Donde:

$Y_{ijkl}$  = Variable respuesta.

$\mu$  = Media general.

$L_i$  = Efecto de la *i*-ésima localidad.

$(R_j L_i)$  = Efecto de la *j*-ésima repetición x localidad.

$G_k$  = Efecto de la *k*-ésima época.

$(L_i G_k)$  = Interacción localidad x época.

$E_{ijkl}$  = Error experimental.

#### Análisis de regresión.

Tanto los análisis de regresión lineal entre el año de liberación (época) del cultivar y las características agronómicas de interés como las gráficas correspondientes se realizaron con el paquete estadístico (Statistica, 2007). Este análisis permitió estimar el progreso genético a lo largo del tiempo. El modelo lineal utilizado fue el siguiente:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + E_i$$

Donde:

$Y_i$  = valor de la característica agronómica evaluada.

$\beta_0$  = Intercepto (valor esperado de la característica agronómica en el primer año considerado en el estudio).

$\beta_1$  = pendiente de la regresión, la cual indica el cambio promedio en la característica agronómica por cada año de mejoramiento (tasa de ganancia genética).

$X_i$  = época de liberación del cultivar.

$E_i$  = error experimental, que captura la variabilidad no explicada por el modelo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos en la evaluación del rendimiento de grano y sus características asociadas de las variedades de triticale liberadas por la UAAAN en las diferentes épocas.

### Rendimiento

Cuadro 3. Resultados y significancia del análisis de varianza combinado entre localidades y épocas para la variable rendimiento de grano (RDTOG), ciclos 2019 al 2023.

FV	GL	Cuadrados medios	Significancia
LOC	18	15.66	**
LOC*REP	38	0.56	**
ÉPOCA	2	80.09	**
LOC*ÉPOCA	36	1.48	**
ERROR	76	0.12	
CV (%)		7.4	

FV=fuente de variación; GL=grados de libertad.

Los efectos principales de LOCALIDAD (LOC) y ÉPOCA, así como la interacción LOC\*ÉPOCA, fueron altamente significativos ( $p < 0.01$ ); el rendimiento de grano presentó variaciones considerables tanto entre localidades como entre épocas de liberación. Este patrón coincide con lo reportado en triticale y otros cereales, donde el ambiente ejerce un papel determinante en la expresión fenotípica del rendimiento (Alheit *et al.*, 2014), y concuerda con Cooper *et al.*, (2022), que señalan que este es un carácter complejo, influenciado fuertemente por factores edafoclimáticos, como temperatura, precipitación y tipo de suelo (Cooper *et al.*, 2022).

Los resultados indican que las localidades evaluadas exhibieron diferencias altamente significativas en el rendimiento de grano ( $p < 0.01$ ). La localidad 14 (Centenario 2021a) registró el mayor promedio de rendimiento ( $7.05 \text{ t ha}^{-1}$ ),

aunque estadísticamente fue similar a la localidad 11 (La Soledad 2024), que alcanzó un rendimiento promedio de  $6.62 \text{ t ha}^{-1}$  considerando las siete variedades evaluadas, (Cuadro 4). Estos hallazgos coinciden con estudios previos en triticale y otros cereales, donde ambientes favorables (con buena disponibilidad de agua, suelos fértiles y manejo agronómico eficiente) se asocian con mayores niveles de producción (Oettler, 2005).

La significancia observada en la interacción LOC\*ÉPOCA indicó que las variedades evaluadas mostraron respuestas diferenciales según el ambiente, destacando así la relevancia de la GxE en los programas de mejoramiento de cereales. Este comportamiento concuerda con observaciones en trigo, donde las interacciones GxE pueden dificultar la selección de genotipos superiores para múltiples ambientes, pero también permiten identificar variedades adaptadas a condiciones específicas (Yan y Tinker, 2006).

Por otra parte, el factor LOC\*REP fue significativo, evidenciando diferencias entre repeticiones dentro de cada localidad. Esta variabilidad puede atribuirse a la heterogeneidad del sitio experimental, incluyendo factores como la fertilidad del suelo, manejo agronómico o microclima, los cuales afectan el desempeño productivo de los genotipos (Piepho *et al.*, 2008). El coeficiente de variación registrado ( $CV= 7.4 \%$ ) se considera adecuado para experimentos de rendimiento en cultivos extensivos, dado que valores inferiores al 10 % reflejan buena precisión experimental (Bertan *et al.*, 2007). En conjunto, estos hallazgos respaldan la confiabilidad de los datos obtenidos.

Finalmente, la alta significancia del factor ÉPOCA proporcionó evidencia de diferencias genéticas entre los grupos de variedades evaluadas, apoyando la hipótesis de avances genéticos en el rendimiento de grano a lo largo del tiempo. Este patrón coincide con lo observado en trigo, donde múltiples estudios han documentado progresos genéticos sostenidos durante varias décadas (Royo *et al.*, 2007).

Cuadro 4. Resultados de la prueba de comparación de medias para el factor localidades (LOC) de la variable rendimiento de grano (RENDG).

Localidad	Nombre	Media	Grupo de significancia
14	Centenario 2021a	7.05	a
11	La Soledad 2024	6.62	ab
13	Centenario 2021	6.39	bc
16	Centenario 2023	6.38	bc
3	Aldama 2021a	5.90	cd
8	Matamoros 2024	5.88	cde
15	Centenario 2022	5.31	de
19	Zacatecas 2021a	5.30	e
2	Aldama 2021	4.62	f
5	Matamoros 2021	4.56	f
17	Centenario 2024	4.06	fg
7	Matamoros 2023	3.91	gh
9	La Soledad 2022	3.87	gh
4	Matamoros 2020	3.81	ghi
1	Aldama 2020	3.59	ghi
18	Zacatecas 2021	3.47	ghi
12	Navidad 2021	3.44	hi
6	Matamoros 2022	3.26	ij
10	La Soledad 2023	2.70	j

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey  $p < 0.05$ )

En contraste, la localidad 10 (La Soledad 2023) mostró el menor rendimiento ( $2.70 \text{ t ha}^{-1}$ ), situándose en un grupo significativamente inferior al de la mayoría de las demás localidades. La baja productividad observada en algunos sitios puede atribuirse a limitantes como déficit hídrico, estrés térmico, suelos poco fértiles o problemas fitosanitarios, factores conocidos como restricciones importantes para el rendimiento del triticale.

Estos resultados resaltan la importancia de considerar las características ambientales de cada región y localidad al diseñar esquemas de mejoramiento y ensayos varietales. Como señalan Triboi *et al.* (2006), el efecto combinado del genotipo y el ambiente puede generar que un mismo genotipo tenga un desempeño destacado en un sitio y limitado en otro, lo que subraya la necesidad de identificar genotipos con amplia adaptación o específica. Esta variabilidad espacial indica que la selección de variedades adecuadas para cada ambiente, junto con el ajuste de las prácticas agronómicas, puede incrementar la productividad del triticale en distintas regiones.

Cuadro 5. Resultados de la prueba de comparación de medias de la variable rendimiento para el factor época de liberación.

Época	Variedad	Media	Significancia
Modernas	AN330 AN388	6.105	a
Intermedias	ANPELÓN AN66 AN184	4.223	b
Antiguas	AN31 AN34	3.914	b

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey  $p < 0.05$ )

La comparación de medias entre épocas para el rendimiento de grano, registró diferencias estadísticas de las variedades modernas en comparación con las intermedias y antiguas, no así entre estas últimas. El grupo de variedades modernas (AN330 y AN388) tuvo el mayor rendimiento promedio, con 6.105 t ha<sup>-1</sup>, valor significativamente superior al registrado por los grupos intermedio y antiguo.

Este hallazgo respalda la idea de que el avance genético en los programas de mejoramiento ha conducido a aumentos sustanciales en el potencial productivo de las variedades más recientes, un fenómeno ampliamente documentado en otros cereales como el trigo (Fischer *et al.*, 2014). El éxito de estos programas se atribuye a la mejora de caracteres que afectan de manera positiva al rendimiento,

como el número y el peso granos por espiga, combinados con la selección por mayor biomasa, eficiencia en el uso de recursos (agua y nutrientes) y resistencia a factores naturales bióticos y abióticos (Lopes *et al.*, 2012).

Por su parte, las variedades liberadas en la época intermedia (ANPELÓN, AN66 y AN184) mostraron un rendimiento promedio de 4.223 t ha<sup>-1</sup>, estadísticamente comparable con el de las variedades antiguas, pero significativamente inferior al de las modernas. Estos resultados reflejan avances genéticos alcanzados durante la época intermedia, aunque con magnitud menor que los logrados en la época moderna.

Al respecto, Stoyanov y Baychev (2023) señalan que los incrementos en rendimiento logrados desde el inicio del desarrollo del potencial productivo del triticale fueron significativos, y que la incorporación de nuevas herramientas de mejoramiento, como la intensificación de la selección por adaptabilidad, permitió ampliar aún más el potencial productivo de las variedades modernas.

El grupo de variedades antiguas (AN31 y AN34) presentó el menor rendimiento, confirmando que estos materiales conservan un alto potencial para producción de forraje, pero limitada producción de grano.

Esta disminución en la productividad puede deberse a una menor eficiencia en el uso de la radiación o utilización de los nutrientes, menor índice de cosecha reducido y susceptibilidad a enfermedades y a otros factores de estrés ambiental, (altas temperaturas al final del ciclo (Reynolds *et al.*, 2017).

### **Componentes de rendimiento**

Los resultados de los análisis de varianza y las pruebas de comparación de medias para los componentes de rendimiento se presentan en los Cuadros 6 al 8. El número de espigas por metro cuadrado (ESPM2) fue significativamente afectado por la localidad ( $p < 0.01$ ), lo que sugiere una alta sensibilidad de esta característica a las condiciones ambientales, tales como disponibilidad hídrica y fertilidad del suelo. No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre localidades para el número de granos por espiga (GRAESP) ni en el número

de granos por metro cuadrado (GRAM2). Resultados similares han sido reportados por Lopes *et al.*, (2012) en estudios de adaptación de cereales en ambientes donde las condiciones fueron contrastantes.

Cuadro 6. Resultados de los análisis de varianza para los componentes de rendimiento de 7 variedades de triticale agrupadas por época de liberación. Ciclo otoño-invierno 2023-2024

FV	GL	ESPM2 Esp m <sup>2</sup>	GRAESP Granos esp	GRAM2 Granos m <sup>2</sup>
LOC	2	16771.9**	11.37	9550836.5
LOC*REP	6	1399.4	25.21*	3840150.9
ÉPOCA	2	1133.4**	1351.21**	1542287771.1**
LOC*ÉPOCA	4	2010.0	11.16	362370.0
ERROR	12	4981.2	5.63	19447541.6
CV (%)		6.3	5.6	9.5

FV=fuente de variación; GL=grados de libertad; ESPM2=espigas por metro cuadrado; GRAESP= granos por espiga; GRAM2= granos por metro cuadrado; CV=coeficiente de variación.

La variable granos por metro cuadrado (GRAM2), considerada un estimador directo del rendimiento, mostró efectos altamente significativos del factor ÉPOCA ( $p < 0.01$ ), lo que respalda el progreso genético en las variedades modernas para esta característica. Este patrón ha sido previamente documentado en cereales como trigo y cebada, donde la mejora genética ha incrementado principalmente el número de granos por unidad de área más que el tamaño del grano o la cantidad de espigas (Fischer *et al.*, 2014).

Asimismo, la variable granos por espiga (GRAESP) presentó diferencias significativas entre épocas de liberación, indicando que las mejoras genéticas también han favorecido una mayor fertilidad de las espigas. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Han *et al.*, (2020), que demuestran que el incremento en la eficiencia reproductiva constituye uno de los principales

objetivos de los programas de mejoramiento de triticale y trigo, con el propósito de compensar las restricciones ambientales en zonas de temporal.

Por otra parte, no se detectaron interacciones significativas entre épocas y localidades para estos componentes del rendimiento, lo que es deseable en los programas de mejoramiento, ya que permite una mayor predictibilidad y estabilidad del rendimiento en diversos ambientes (Yan y Holland, 2010; Cooper *et al.*, 2020).

Cuadro 7. Prueba de comparación de medias del factor localidad, para las variables componentes de rendimiento.

LOCALIDAD	NOMBRE	ESPM2 Espigas m <sup>-2</sup>	GRAESP Granos espiga	GRAM2 Granos m <sup>-2</sup>
1	SOLEDAD	321 b	42 a	13521 a
2	CAMPANARIO	287 c	42 a	13485 a
3	CENTENARIO	348 a	40 a	12887 a

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey  $p < 0.05$ )

Las pruebas de medias entre localidades arrojaron los siguientes resultados (Cuadro 7); para ESPM2, Centenario registró la densidad más alta (348 espigas m<sup>2</sup>), seguido por Soledad (321 espigas m<sup>2</sup>) y Campanario (287 espigas m<sup>2</sup>). Estas variaciones sugieren que la capacidad de ahijamiento fue más eficiente en Centenario, posiblemente como consecuencia de condiciones edáficas (fertilización) más favorables durante el ciclo de cultivo. Relacionado a esto, Lopes *et al.*, (2012), enfatizaron la importancia del ambiente en la determinación de la densidad de espigas en cereales de invierno bajo condiciones de temporal.

En cuanto a GRAESP, no se detectaron diferencias significativas, con valores similares en Soledad y Campanario (42 granos/espiga) y ligeramente inferiores en Centenario (40 granos/espiga). Esta uniformidad indica que la fertilidad de la espiga se mantuvo constante entre localidades, lo que puede atribuirse a la

plasticidad genética del triticale para conservar su buena capacidad reproductiva frente a distintos ambientes y condiciones (Han *et al.*, 2020).

Respecto a GRAM2, aunque las medias no difirieron significativamente, Soledad presentó el valor más alto (13,521 granos m<sup>-2</sup>), sugiriendo que esta localidad proporcionó condiciones más propicias para alcanzar el rendimiento potencial. No obstante, el hecho de que Centenario, a pesar de presentar mayor densidad de espigas, no superara a Soledad en GRAM2, indica la existencia de una posible compensación negativa entre número de espigas y granos por espiga, un fenómeno que ya ha sido estudiado previamente en cereales (Sadras y Slafer, 2012). Este tipo de relaciones compensatorias se producen con frecuencia cuando el aumento de un componente del rendimiento ocurre a costa de otro, limitando el resultado final del rendimiento total. Como afirman Fischer *et al.*, (2014), el desafío del mejoramiento actual consiste en identificar genotipos que reduzcan estas situaciones bajo condiciones agrícolas y climáticas diversas.

Cuadro 8. Prueba de comparación de medias de los componentes de rendimiento entre épocas de liberación. Ciclo 2022-2023.

ÉPOCA	NOMBRE	ESP Esp m <sup>-2</sup>	GRAESP Granos/esp	GRAM2 Granos m <sup>-2</sup>
MODERNAS	AN330	464 a	61 a	27559 a
	AN388			
INTERMEDIAS	ANPELÓN	381 b	49 b	18773 b
	AN66			
	AN184			
ANTIGUAS	AN31	350 c	42 c	15366 c
	AN34			

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey p<0.05)

El Cuadro 8 muestra que las variedades modernas (AN-330 y AN-388) exhibieron, en promedio, un mayor número de espigas por metro cuadrado (ESPM2) y un mayor número de granos por espiga (GRAESP), lo que se tradujo en una densidad superior de granos por unidad de área (GRAM2) en comparación con las variedades de la época intermedia y antigua. El aumento

observado en ESPM2 y GRAESP en las variedades modernas puede interpretarse como resultado de la selección orientada a maximizar la producción de órganos reproductivos viables, mediante un mayor número de primordios que alcanzan el llenado de grano y una eficiencia reproductiva mejorada. Estudios fisiológicos y genéticos actuales indican que el número de granos responde de manera positiva al progreso en el mejoramiento genético, y que las mejoras en este componente explican en gran parte las ganancias en el rendimiento obtenidas a través del tiempo en el mejoramiento de cereales (Sadras y Slafer, 2012). En contraste, las variedades intermedias y antiguas presentaron valores significativamente menores de espigas por metro cuadrado y granos por espiga, lo que se reflejó en una menor densidad de granos por unidad de superficie. Esto concuerda con estudios que evidencian que además del manejo agronómico y las condiciones ambientales, las variedades modernas muestran una mayor capacidad para aprovechar los insumos y generar un mayor número de espigas y, por ende, más granos por unidad de área (Reynolds *et al.*, 2017). En resumen, en este estudio, las variedades modernas de triticale se caracterizaron por su superioridad en los componentes que conforman al rendimiento, especialmente en la densidad de espigas y el número total de granos por unidad de superficie. Este resultado pone de manifiesto la influencia positiva del mejoramiento genético en la capacidad de producción de las variedades actuales.

Además de las variables agro-morfológicas relacionadas con el rendimiento de los grupos de variedades invernales, en el presente estudio se incorporaron algunas variables adicionales, con el objetivo de complementar la caracterización de las variedades de triticale. Entre esas variables se incluyó la altura de planta, la cual es un carácter asociado al porte y a la competencia por luz (Cuadro 9). El efecto del factor ÉPOCA indicó diferencias en la altura de las variedades, lo que puede relacionarse con el enfoque del mejoramiento genético hacia la reducción de la altura de planta como estrategia para mejorar la eficiencia en la partición de asimilados al grano (Reynolds *et al.*, 2009). Los resultados de este estudio para la altura de planta (Cuadro 9), revelaron una reducción significativa de esta

característica entre los distintos grupos de variedades según su época de liberación (Cuadro10).

Cuadro 9. Resultados del análisis de varianza entre localidades y épocas para la variable altura de planta (ALT), ciclo 2022-2023.

FV	GL	ALT (cm)
LOC	2	1504.89 **
LOC*REP	15	51.9 **
ÉPOCA	2	71.7**
LOC*ÉPOCA	4	13.2 **
ERROR	30	13.65
CV (%)		3.0

FV=fuente de variación; GL=grados de libertad; ALT=altura de planta; REP=repeticón; C.V.=coeficiente de variación.

Cuadro 10. Resultados de la prueba de comparación de medias entre épocas para la variable altura de planta (ALT).

ÉPOCA	VARIEDAD	ALTURA (cm)
MODERNAS	AN330	113.8 c
	AN388	
INTERMEDIAS	ANPELÓN	123.8 b
	AN66	
	AN184	
ANTIGUAS	AN31	128.2 a
	AN34	

Columnas con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey  $p < 0.05$ )

Uno de los objetivos de los programas de mejoramiento en cereales de grano pequeño, incluyendo el triticale, es reducir la altura de planta con el fin de disminuir o evitar el acame y mejorar la capacidad de aprovechamiento de los fotoasimilados hacia el grano, sin comprometer la producción de biomasa (Acevedo y Silva, 2007). De hecho, estudios contemporáneos demuestran que los genes de enanismo, (Rht12) del trigo y (Ddw1) del centeno, han sido introducidos en triticale para obtener materiales de porte intermedio o bajo, con

mejor rendimiento en diferentes entornos (Poehlman y Sleper, 1995; Trini *et al.*, 2021). En este sentido, los resultados sugieren que la altura de planta en triticale ha sido un carácter clave en la estrategia de mejoramiento de la UAAAN, y que las variedades modernas muestran una tendencia hacia portes más bajos, en concordancia con las necesidades actuales de sistemas de doble propósito. El análisis de comparación de medias (Cuadro 10) identificó diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de variedades, clasificadas según su época de liberación. Las variedades antiguas mostraron la mayor altura promedio (128 cm), seguidas por las intermedias (123 cm) y las modernas, que presentaron la estatura más baja (113 cm). Esta disminución progresiva en la altura refleja una tendencia ampliamente documentada en el mejoramiento de cereales, la cual tiene como objetivo disminuir el riesgo de acame y mejorar la eficiencia en la asignación de biomasa hacia el grano (Reynolds *et al.*, 2009).

Específicamente en el cultivo de triticale, la selección por menor altura también se ha relacionado con una mayor estabilidad del rendimiento bajo condiciones particulares como alta fertilidad o exceso de riego (Velasco-López *et al.*, 2025). Estos resultados corroboran un balance entre una funcional capacidad de generación de biomasa y una aceptable y eficaz producción de grano, paralelo con los objetivos de programas de mejoramiento orientados a sistemas de producción de forraje y grano (Varshney *et al.*, 2021).

## Regresiones lineales

Cuadro 11. Resultados de los análisis de varianza de la regresión lineal simple entre la época de liberación de las variedades y las variables estudiadas.

FV	GL	RENDG t ha <sup>-1</sup>	ESPM2 Esp m <sup>-2</sup>	GRAESP Granos*esp	GRAM2 Granos m <sup>-2</sup>	ALT cm
ÉPOCA	1	93.76**	74.4**	2142.61**	136.44**	206.97**
$\beta_0$		-107.04	-5448.90	-902.17	-607,630	846.01
$\beta_1$		1.09	56.75	9.25	6096.5	-7.02
R		0.87	0.84	0.92	0.93	-0.91
R <sup>2</sup>		0.75	0.71	0.85	0.0.87	0.84
p		0.01	0.01	0.002	0.001	0.003

FV=fuente de variación; GL=grados de libertad;  $\beta_0$ = intercepto;  $\beta_1$ = pendiente de la regresión; R= coeficiente de correlación; R<sup>2</sup>=coeficiente de determinación; p=probabilidad.

Los análisis de varianza del modelo de regresión lineal simple reportaron un efecto positivo y significativo de la época de liberación de las variedades sobre el rendimiento de grano (REND) y sus componentes asociados, tales como el número de espigas por m<sup>2</sup> (ESPM2), granos por espiga (GRAESP) y granos por m<sup>2</sup> (GRAM2); mientras que se observó un efecto negativo y significativo sobre la altura de planta (ALT). La significancia estadística registrada para las características en estudio ( $p < 0.01$ ) confirma que la época de liberación, como indicador de la evolución genética y el progreso en el programa de mejoramiento de triticale, ha ejercido un impacto relevante sobre estas características agronómicas.

El coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) para el rendimiento de grano fue de 0.75, lo que indica que el modelo explicó el 75 % de la variabilidad observada en esta variable en función de la época de liberación. Como se observa en la Figura 1, se registró un incremento progresivo y significativo en el rendimiento de grano al comparar las variedades modernas con las de épocas anteriores, lo cual corrobora la ganancia genética asociada al avance de los programas de mejoramiento durante el periodo evaluado (Cuadros 12 y 13). Con respecto a los componentes del rendimiento (Cuadro 11), el número de espigas por m<sup>2</sup> (ESPM2)

y el número de granos por espiga (GRAESP) registraron tendencias positivas y significativas, con  $R^2$  altos (0.71 y 0.85, respectivamente), lo que señala que estas características estuvieron fuertemente influenciadas por la época de liberación, (Orsua *et al.*, 2022). Avances recientes en cereales de invierno han resaltado la importancia de maximizar el número de espigas para obtener una mejora en el rendimiento (Blum, 2010; Lopes *et al.*, 2012). Por otra parte, el número de granos por  $m^2$  (GRAM2) registró un  $R^2$  de 0.87 y una pendiente positiva y significativa, confirmando que la selección en base al aumento de la densidad de granos por unidad de superficie ha sido efectiva en el mejoramiento genético (Ferrante *et al.*, 2013), (Cuadros 12 y 13, Figuras 2-4).

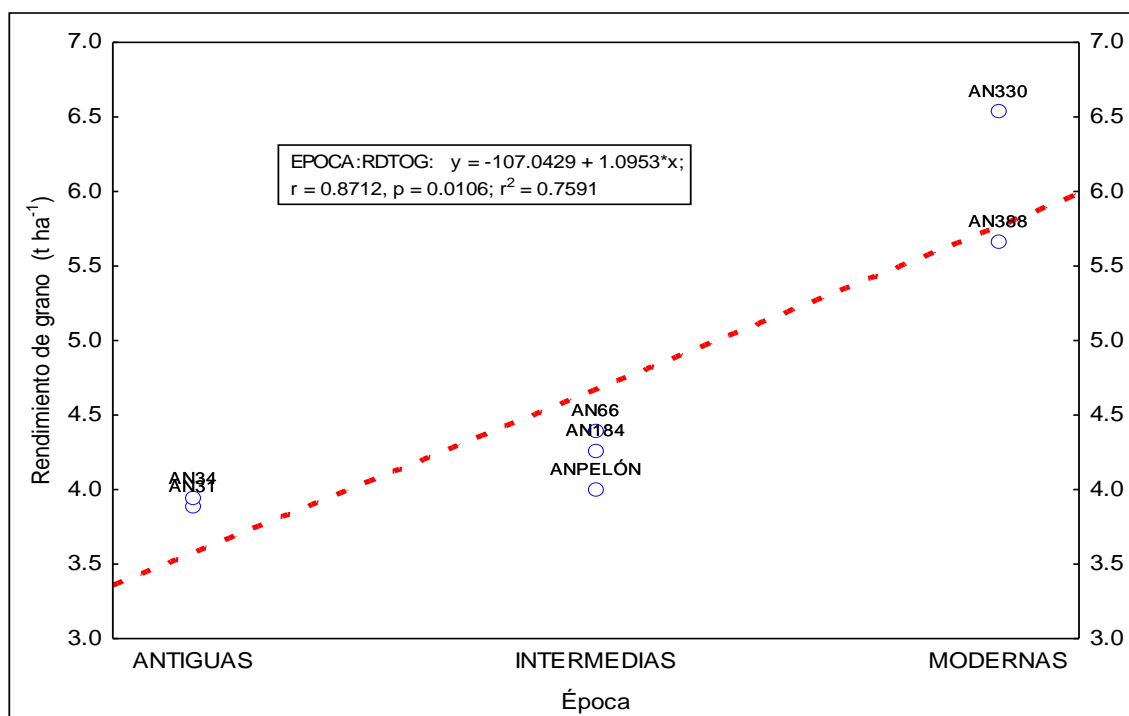


Figura 1. Relación entre el rendimiento de grano y la época de liberación de las variedades de triticale generadas por la UAAAN. 1992-2022.

La Figura 1 ilustra el aumento gradual y significativo en el rendimiento de grano al comparar las variedades modernas con las liberadas en épocas anteriores, lo que comprueba las ganancias genéticas logradas a lo largo del proceso de mejoramiento durante el periodo señalado representadas en los Cuadros 12 y 13.

Cuadro 12. Ganancias genéticas absolutas por año para el rendimiento de grano (RENDG) y sus componentes de las variedades en estudio de acuerdo a su época de liberación.

	RENDG	ESPM2	GRAESP	GRAM2	ALT
	kg ha *	esp m <sup>-2</sup> *	granos * espiga	granos * m <sup>-2</sup>	cm *
	año	año	*año	*año	año
M vs A	70.0	3.8	0.6	499.6	-0.46
M vs Int	236.2	10.1	1.5	1832.6	-1.36
Int vs A	9.5	1.5	0.27	14.8	-0.14

M vs A=Modernas vs Antiguas; M vs Int=Modernas vs Intermedias; Int vs A= Intermedias vs Antiguas.

Cuadro 13. Ganancias genéticas relativas (%) por año para el rendimiento de grano (RENDG) y sus componentes de las variedades en estudio de acuerdo a su época de liberación.

	RENDG	ESP	GRAESP	GRAM2	ALT
	kg ha *	esp m <sup>-2</sup> *	granos * espiga	granos * m <sup>-2</sup>	cm *
	año	año	*año	*año	año
M vs A	2.1	2.5	2.3	1.6	-3.7
M vs Int	8.5	10.3	9.9	6.3	-13.6
Int vs A	4.3	4.1	3.9	4.4	-4.6

M vs A=Modernas vs Antiguas; M vs Int=Modernas vs Intermedias; Int vs A= Intermedias vs Antiguas

Estudios recientes han reportado que la regresión del rendimiento sobre el año de liberación es una herramienta práctica para cuantificar la efectividad de los esquemas de mejoramiento en cereales (Fischer *et al.*, 2014).

Los cuadros 12 y 13 muestran las ganancias genéticas tanto absolutas como relativas por año en variedades de triticale de hábito invernal, evaluando variables clave como rendimiento de grano (REND), espigas por metro cuadrado (ESP), número de granos por espiga (GRAESP), número de granos por metro

cuadrado (GRAM2) y altura de planta (ALT). En general, se observó una tendencia positiva en las ganancias genéticas para el rendimiento y sus componentes al comparar variedades modernas con antiguas e intermedias, lo cual coincide con los reportes actuales sobre mejoramiento genético en triticale y otros cereales.

La comparación entre variedades modernas y antiguas (M vs A) mostró un aumento absoluto de 70 kg ha<sup>-1</sup> por año en rendimiento de grano, con un incremento relativo del 2.1% anual. Estos valores son consistentes con lo reportado por Ferrante *et al.*, (2017), quienes observaron mejoras genéticas anuales en rendimiento de triticale cercanas al 1.8-2.5% bajo condiciones de clima mediterráneo. Además, en este estudio, el incremento en el número de espigas por metro cuadrado (3.8 espigas m<sup>-2</sup> absoluto y 2.5% relativo) y granos por espiga (0.6 granos/espiga absoluta y 2.3% relativo) sugiere que el mejoramiento ha sido efectivo tanto en la formación de estructuras reproductivas como en la fertilidad.

La comparación entre modernas e intermedias (M vs Int) reveló un aumento absoluto en rendimiento de 236.2 kg ha<sup>-1</sup> y un incremento relativo del 8.5% anual, lo que indica que las últimas generaciones de variedades han incorporado avances genéticos importantes. Esta observación está en línea con lo reportado por Velasco-López *et al.*, (2025), quienes destacan que las nuevas variedades de triticale presentan mejoras significativas en parámetros fenotípicos y genéticos asociados al rendimiento, gracias a la selección asistida y la incorporación de materiales adaptados a ambientes específicos.

Por otro lado, la altura de planta mostró una reducción de 13.6% anual en el caso de las variedades modernas vs intermedias. Esta reducción de altura es deseable desde el punto de vista agronómico, ya que plantas más bajas tienden a ser más resistentes a problemas de acame y favorecen un mejor aprovechamiento de recursos, como señalan estudios recientes de Paccapelo *et al.*, (2015) en triticale.

Las ganancias genéticas entre intermedias y antiguas (Int vs A) fueron moderadas pero positivas, lo que refleja un progreso continuo en la mejora

genética a lo largo de los años, apoyado en el uso de herramientas estadísticas y fenotípicas modernas para evaluar y seleccionar genotipos superiores (Fischer *et al.*, 2014).

Los hallazgos anteriores coinciden con lo reportado por Perry y D'Antuono (1989) en trigo y Mi *et al.*, (2025) en triticale, quienes registraron incrementos lineales en el rendimiento como respuesta a la mejora genética a lo largo del tiempo. La ganancia genética en el rendimiento también estuvo relacionada con el progreso en los componentes de rendimiento, como el número de granos por espiga y el número de granos  $m^2$  (Cuadros 7 y 8). Esta relación positiva entre las características antes mencionadas explicó la tendencia ascendente observada en la Figura 1, dado que el rendimiento es una característica de naturaleza compleja y multigénica, que depende en gran medida de los componentes que lo afectan (Slafer *et al.*, 2014).

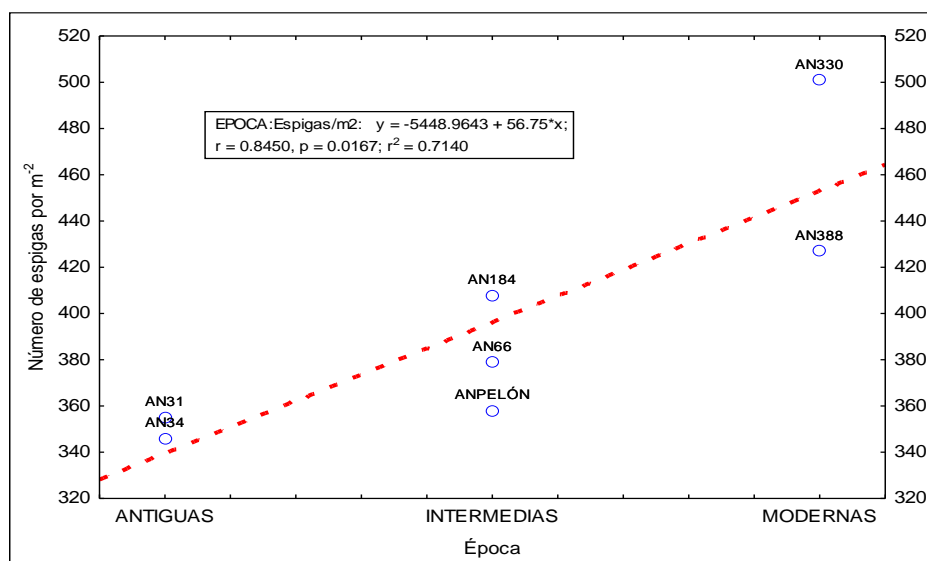


Figura 2. Relación entre el número de espigas por metro cuadrado y la época de liberación de las variedades generadas por la UAAAN.1992-2022.

Los resultados anteriores confirman que las estrategias implementadas han sido eficaces para aumentar y mejorar el potencial de rendimiento, al fortalecer la precisión en la etapa de selección (Reynolds *et al.*, 2009; Rodríguez-Pérez *et al.*, 2023).

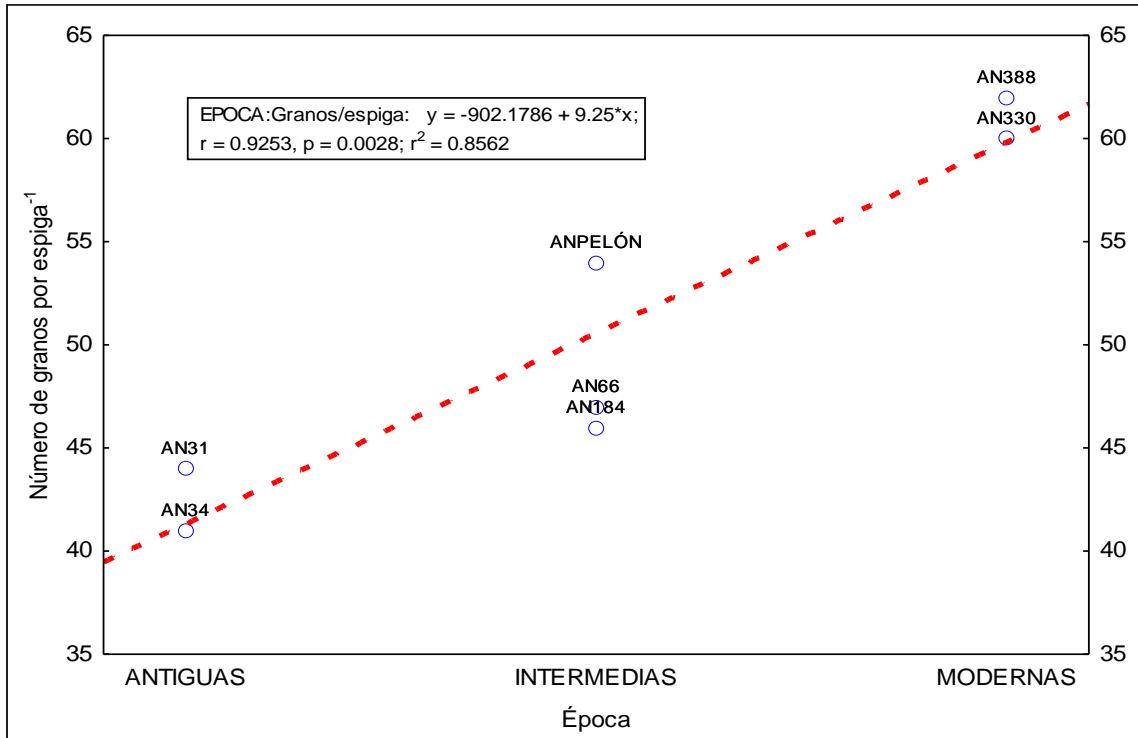


Figura 3. Relación entre el número de granos por espiga y la época de liberación de las variedades de triticale generadas por la UAAAN.1992-2022.

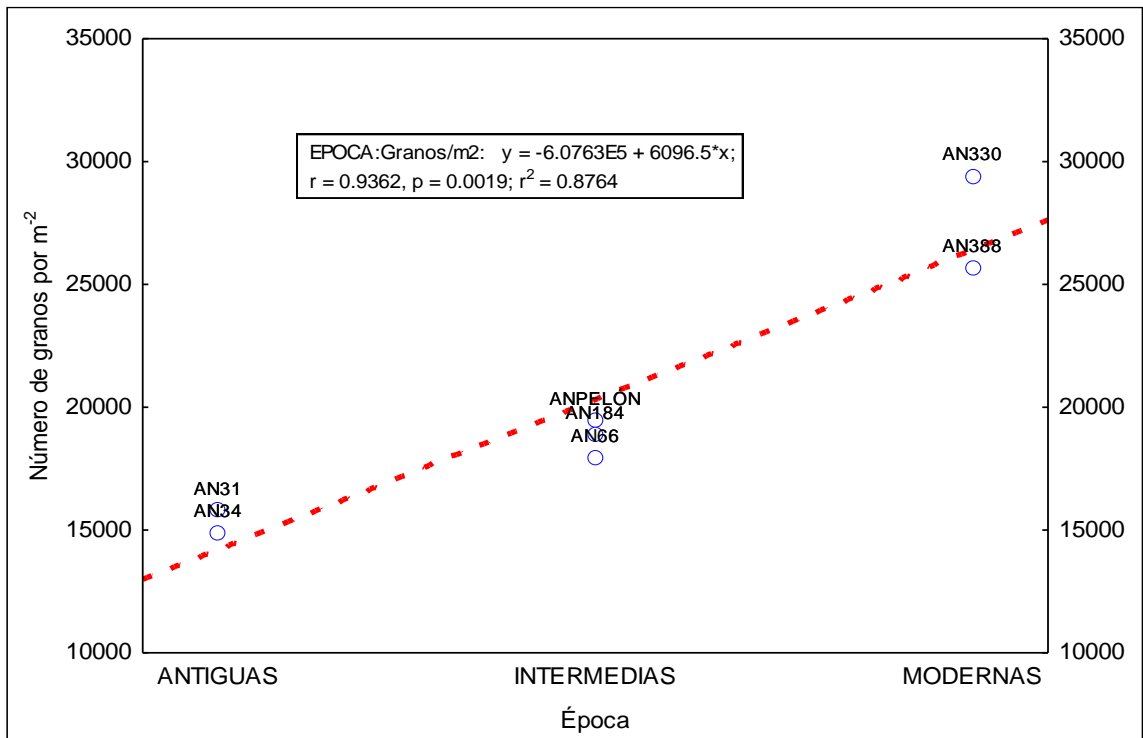


Figura 4. Relación entre el número de granos por metro cuadrado y el año de liberación de las variedades de triticale generadas por la UAAAN.1992-2022.

La altura de planta (ALT), (Figura 5), presentó una relación diferente en comparación con las demás características del estudio, ya que mostró una tendencia negativa de acuerdo a la época de liberación ( $\beta_1 = -7.02$ ); las variedades modernas fueron las de menor altura. La menor estatura de planta se asocia con la introducción de genes de enanismo (Rht), los cuales moderan el acame y contribuyen a mejorar la estabilidad del cultivo (Slafer *et al.*, 2014; Han *et al.*, 2020).

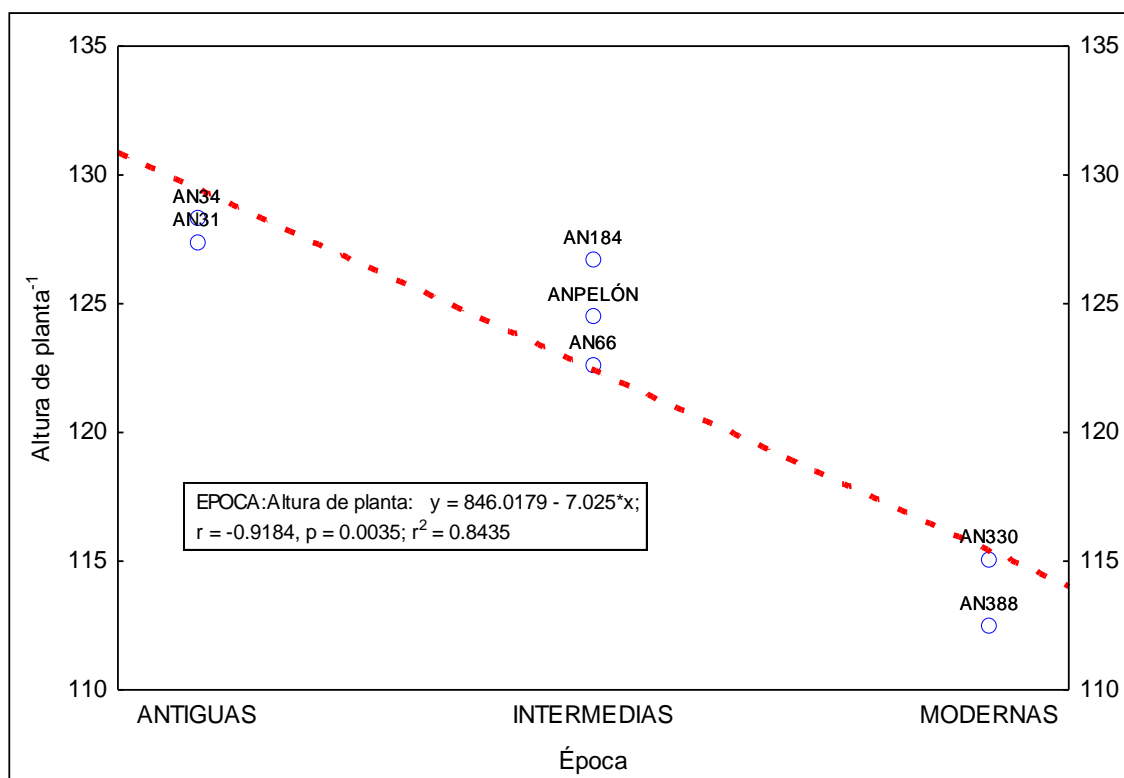


Figura 5. Relación entre la altura de planta y el año de liberación de las variedades de hábito invernal, generadas por la UAAAN en el periodo de 1992-2022.

En conjunto, los resultados de este estudio demuestran que la evolución del proceso de mejoramiento a través del tiempo ha influido en las características

morfo-fisiológicas del cultivo de triticale, elevando el rendimiento en base a una mayor y mejor expresión de sus componentes (Cuadros 12 y 13), lo cual coincide con lo mencionado por diversos autores en diferentes estudios, particularmente en los cultivos de trigo harinero, trigo cristalino o duro y en triticale, (Royo *et al.*, 2007; Paccapelo *et al.*, 2015; Valvo *et al.*, 2018; Stoyanov *et al.*, 2022; Stoyanov y Baychev, 2023).

De la misma manera, se ha reportado que espigas más compactas y con alta fertilidad de las espiguillas han sido piezas clave para elevar la cantidad de granos por espiga sin necesidad de aumentar la longitud de la misma (Ferrante *et al.*, 2013). Estas acciones favorecen un balance más productivo entre la generación de biomasa y su vía de distribución a los granos, potenciando su número sin condicionar la calidad fisiológica del cultivo (Reynolds *et al.*, 2009, Fischer y Edmeades., 2010). En esta investigación, los cambios en la altura de planta mostraron una tendencia descendente en la estatura de las variedades evaluadas a lo largo del tiempo. Esta reducción en la altura de planta puede atribuirse a la selección hacia materiales más compactos y resistentes al acame, una meta común en programas de mejoramiento de cereales, donde se busca que plantas más cortas no solo mejoren la estabilidad mecánica del cultivo, sino que también beneficien una mayor eficiencia en el reparto de asimilados hacia estructuras reproductivas como espigas y granos, como lo han descrito Reynolds *et al.* (2009) y Slafer *et al.* (2014). Además, la tendencia hacia menor altura ha sido parte de la modernización genética en trigos y triticales, influenciada por la incorporación de genes enanos o semienanos (*Rht*) que reducen la elongación del tallo sin comprometer el rendimiento (Peng *et al.*, 1999). Estos cambios en la estructura de la planta, han sido cruciales para lograr un mayor rendimiento y una adaptabilidad considerable a altas densidades de siembra y sistemas mecanizados (Miralles y Slafer, 1995). Sin embargo, una consideración importante es que una reducción excesiva en la altura podría comprometer el potencial forrajero, por lo que es importante regular este carácter en función del uso final del cultivo.

## CONCLUSIONES

- El análisis de la serie histórica de variedades forrajeras de triticales de hábito invernal liberadas por la UAAAN entre 1992 y 2022 confirmó el avance genético en el rendimiento de grano, demostrado por el alto desempeño del grupo de variedades modernas en comparación con las intermedias y las antiguas.
- Los componentes del rendimiento que más contribuyeron a este aumento fueron el número de granos por espiga y el número de granos por metro cuadrado, parámetros que presentaron diferencias altamente significativas entre las diferentes épocas y mostraron tendencias semejantes a lo reportado para otros cereales de invierno.
- La reducción progresiva en la altura de planta observada en las variedades más recientes sugiere un ajuste genético para minimizar o evitar el riesgo de acame y optimizar la vía de distribución de asimilados hacia el grano, manteniendo a la par su valor como cultivo forrajero.
- La ganancia genética anual estimada el rendimiento de grano fue positiva y significativa, lo que demuestra que el programa de mejoramiento de triticales de la UAAAN ha logrado desarrollar variedades con mayor potencial productivo sin comprometer la productividad forrajera.

## REFERENCIAS

- Acevedo, E., y Silva, P. (2007). *Trigo candeal: calidad, mercado y zonas de cultivo*. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. ISBN: 978-956-19-0583-2.
- Acreche, M. M., y Slafer, G. A. (2011). Lodging yield penalties as affected by breeding in Mediterranean wheats. *Field Crops Research*, 122(1), 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.02.004>.
- Alheit, K.V., Busemeyer, L., Liu, W. *et al.* Multiple-line cross QTL mapping for biomass yield and plant height in triticale ( $\times$  *Triticosecale* Wittmack). (2014). *Theor Appl Genet* **127**, 251–260. <https://doi.org/10.1007/s00122-013-2214-6>
- Araus, J. L., Kefauver, S. C., Zaman-Allah, M., Olsen, M. S., y Cairns, J. E. (2018). Translating high-throughput phenotyping into genetic gain. *Trends in Plant Science*, 23(5), 451-466. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.02.001>.
- Berevachk, V. (2023). Evaluación de producción de forraje, rendimiento en grano y calidad en genotipos de triticale y trigo en la región de La Pampa. Tesis de grado, Universidad Nacional de La Pampa. <https://repo.unlpam.edu.ar/bitstream/handle/unlpam/9082/atg-bereva024.pdf>
- Bertan, I., de Carvalho, F. I., y Oliveira A., C. D. (2007). Parental selection strategies in plant breeding programs. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 10(4), 211-222.
- Blum, A. (2010). *Plant breeding for water-limited environments*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-4>.
- Cárdenas J., G. C., del Río, A. J. L., Villa, V. M. Z., Corral, E. P., y Kuruvadi, S. (1998). Estabilidad en rendimiento de triticale (*X. Triticosecale* Wittmack) en seis ambientes del norte de México. *Revista Agraria*, 14(1), 43-58. <https://doi.org/10.59741/agraria.v14i1.238>.

- CIMMYT. (2008). Triticale: Crop and food security contributions. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). Disponible en: <https://repository.cimmyt.org/server/api/core/bitstreams/5ac9ca0a-8dcc-4640-a343-95880e27a379/content>.
- Cooper, M., Messina, C. D., Tang, T., Gho, C., Powell, O. M., Podlich, D. W., Hammer, G. L. (2022). Predicting Genotypex Environmentx Management (Gx Ex M) interactions for the design of crop improvement strategies: integrating breeder, agronomist, and farmer perspectives. *Plant Breeding Reviews*, 46, 467-585. <https://doi.org/10.1002/9781119874157.ch8>.
- Ferrante, A., Cartelle, J., Savin, R., y Slafer, G. A. (2017). Yield determination, interplay between major components and yield stability in a traditional and a contemporary wheat across a wide range of environments. *Field Crops Research*, 203, 114-127. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.028>.
- Ferrante, A., Savin, R., y Slafer, G. A. (2013). Is floret primordia death triggered by floret development in durum wheat? *Journal of Experimental Botany*, 64(10), 2859-2869. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert129>.
- Fischer, R. A., Byerlee, D., y Edmeades, G. (2014). Crop yields and global food security. ACIAR: Canberra, ACT, 8-11. ISBN 978 1 925133 06 6.
- Fischer, R. A., y Edmeades, G. O. (2010). Breeding and cereal yield progress. *Crop Science*. 50:S-85–S-98. [https://doi: 10.2135/cropsci2009.10.0564](https://doi:10.2135/cropsci2009.10.0564)
- Han, J., Zhang, Z., Cao, J., Luo, Y., Zhang, L., Li, Z., y Zhang, J. (2020). Prediction of winter wheat yield based on multi-source data and machine learning in China. *Remote Sensing*, 12(2), 236. <https://doi.org/10.3390/rs12020236>.
- Infoagro. "El cultivo del Triticale". INFOAGRO, 2023. [https://www.infoagro.com/documentos/el cultivo del triticale.asp](https://www.infoagro.com/documentos/el_cultivo_del_triticale.asp)
- INIA. 2022. "Triticale en el sur de Chile". Biblioteca Digital INIA, 2022. <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/748ecce8-875c-486d-9c63-4bbd64c07b02/content>.
- Jobet, C., Mellado, M., Matus, I., Galdames, R., Ortiz, C., Pauchard, H., & García, J. C. (2016). Manejo Agronómico del Triticale. Biblioteca Digital INIA.

<https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/8b2136f2-e9b1-45d1-ad70-76c9550aa754/content>.

Lopes, M. S., Reynolds, M. P., Jalal-Kamali, M. R., Moussa, M., Feltaous, Y., Tahir, I. S. A., y Baum, M. (2012). The yield correlations of selectable physiological traits in a population of advanced spring wheat lines grown in warm and drought environments. *Field Crops Research*, 128, 129-136.

<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.017>.

Mendoza-Elos, M., Cortez-Baheza, E., Rivera-Reyes, J. G., Rangel-Lucio, J. A., Andrio-Enríquez, E., y Cervantes-Ortiz, F. (2011). Época y densidad de siembra en la producción y calidad de semilla de triticale (X *Triticosecale* Wittmack). *Agronomía Mesoamericana*, 22(2), 309-316.

<https://doi.org/10.15517/am.v22i2.11804>.

Mergoum, M., Singh, P. K., Pena, R. J., Lozano-del Río, A. J., Cooper, K. V., Salmon, D. F., and Macpherson, H. G. 2009. Triticale: a “new” crop with old challenges. In *Cereals*, pp. 267-287. Springer, New York, NY. [https://doi: 10.1007/978-0-387-72297-9](https://doi.org/10.1007/978-0-387-72297-9)

Mi, D., Zhou, Z., Zhang, X., Ren, A., Ren, Y., Sun, M., y Gao, Z. (2025). Exploring the optimal N application to improve the yield, N utilization, and quality of triticale (*Triticosecale* Wittm.) in the Chinese Loess parent material area. *Agronomy*, 15 (2), 369.

<https://doi.org/10.3390/agronomy15020369>.

Miralles, D. J., y Slafer, G. A. (2007). Sink limitations to yield in wheat: how could it be reduced? *Journal of Agricultural Science*, 145(2), 139–149.

<https://doi.org/10.1017/S0021859607006752>.

Oettler, G. (2005). The fortune of a botanical curiosity—Triticale: past, present and future. *The Journal of Agricultural Science*, 143(5), 329-346. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005290>.

Orsua Banda, D. A. (2022). Potencial de rendimiento de grano en triticales de diferente hábito de crecimiento. Tesis de Licenciatura. Ingeniero Agrónomo en Producción. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

- Paccapelo, H., Ferreira, V., Castaño, M., Ferrari, E., Dominguez, R., Grassi, E., y Moreno, O. (2015). Mejoramiento genético de “triticales”(X *Triticosecale* Wittmack) y “tricepiros”(X *Triticosecale* Wittmack xx *Agrotriticum* Ciferri & Giacom) con diferentes aptitudes de uso. *Semiárida*, 25(2), 58-59. <https://ojs.unlpam.edu.ar/index.php/semiarida/article/view/2579>.
- Peng, J., Richards, D. E., Hartley, N. M., Murphy, G. P., Devos, K. M., Flintham, J. E., Beales, J., Fish, L. J., Worland, A. J., Pelica, F., Sudhakar, D., Christou, P., Snape, J. W., Gale, M. D., y Harberd, N. P. (1999). 'Green revolution' genes encode mutant gibberellin response modulators. *Nature*, 400(6741), 256–261. <https://doi.org/10.1038/22307>.
- Perry, M. W., y D'Antuono, M. F. (1989). Yield improvement and associated characteristics of some Australian spring wheat cultivars introduced between 1860 and 1982. *Australian Journal of Agricultural Research*, 40 (3), 457-472. <https://doi.org/10.1071/AR9890457>.
- Piepho, H. P., Möhring, J., Melchinger, A. E., y Büchse, A. (2008). BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. *Euphytica*, 161(1), 209-228. <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9449-8>.
- Plana Llerena, R. R., González Cañizares, P. J., Rivera Espinosa, R., Varela Nualles, M., y Álvarez Gil, M. A. (2016). Producción de forraje a base de triticale (X *Triticosecale* Wittmack) en suelo nitisol ferrálico lúxico, con dosis variables de nitrógeno e inoculación con hongos micorrízicos arbusculares. *Cultivos Tropicales*, 37(2), 22-32. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1583.2567>.
- Poehlman, J. M., y Sleper, D. A. (1999). *Breeding Field Crops* (4a Ed. 510 pp). Iowa State University Press, Ames. **ISBN-13:978-0813824277**
- Reynolds, M. P., Pask, A. J. D., Hoppitt, W. J. E., Sonder, K., Sukumaran, S., Molero, G., Saint Pierre, C., Payne, T., Singh, R. P., Braun, H. J., *et al.* (2017). Strategic crossing of biomass and harvest index-source and sink-achieves genetic gains in wheat. *Euphytica*, 213, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s10681-017-2002-7>.

- Reynolds, M., Foulkes, M. J., Slafer, G. A., Berry, P., Parry, M. A., Snape, J. W., y Angus, W. J. (2009). Raising yield potential in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 60 (7), 1899-1918.  
<https://doi.org/10.1093/jxb/erp016>
- Rodríguez-Pérez, G., Cervantes-Ortiz, J. F., Gámez-Vázquez, A. J., Reynaga-Franco, F. de J., Torres-Velázquez, J. R., y Ávila-Perches, M. Ángel. (2023). Valor nutritivo en granos de triticale como alternativa en la industria alimentaria. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(3), 351–362.  
<https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.2870>.
- Rodríguez-Pérez G, Reynaga-Franco F de J, Cadena-Cadena F, Cervantes Ortiz F, Gámez-Vázquez AJ, Ávila-Perches MA, Mayek Pérez N y García-Ramírez A. (2023). Biomass production in spring habit triticale (*X Triticosecale* Wittmack) elite lines. *Agrociencia*. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i6.2570>
- Royo, C., Alvaro, F., Martos, V., Ramdani, A., Isidro, J., Villegas, D., y García del Moral, L. F. (2007). Genetic changes in durum wheat yield components and associated traits in Italian and Spanish varieties during the 20th century. *Euphytica*, 155, 259-270.  
<https://doi.org/10.1007/s10681-006-9327-9>
- SAS Institute. (2004). *The SAS system for Windows*. Release 9.1. Cary NC Inst, 654 p.
- STATISTICA. (2007). Version 10.0. StatSoft. Tulsa, OK, USA.
- Sadras, V. O., y Slafer, G. A. (2012). Environmental modulation of yield components in cereals: Heritability's reveal a hierarchy of phenotypic plasticities. *Field Crops Research*, 127, 215-224.  
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.11.014>.
- Slafer, G. A., y Andrade, F. H. (1989). Genetic improvement in bread wheat (*Triticum aestivum*) yield in Argentina. *Field Crops Research*, 21(3-4), 289-296. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(89\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0378-4290(89)90010-5).

- Slafer, G. A., Elia, M., Savin, R., García, G. A., Terrile, I. I., Ferrante, A., y González, F. G. (2015). Fruiting efficiency: an alternative trait to further rise wheat yield. *Food and Energy Security*, 4(2), 92-109.  
<https://doi.org/10.1002/fes3.59>.
- Slafer, G. A., Satorre, E. H., y Andrade, F. H. (2021). Increases in grain yield in bread wheat from breeding and associated physiological changes. In *Genetic Improvement of Field Crops* (pp. 1-68). CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/9781003210238-1>.
- Stoyanov, H., y Baychev, V. (2023). Achievements and tendencies in the breeding of triticale (*X Triticosecale* Wittm.) in Bulgaria. *Bulgarian Journal of Crop Science*, 60(4) 3-16.
- Triboi, E., Martre, P., Girousse, C., Ravel, C., y Triboi-Blondel, A. M. (2006). Unravelling environmental and genetic relationships between grain yield and nitrogen concentration for wheat. *European Journal of Agronomy*, 25(2), 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.04.004>.
- Trini, J., Maurer, H. P., Neuweiler, J. E., & Würschum, T. (2021). Identification and fine-mapping of quantitative trait loci controlling plant height in central European winter triticale (*xTriticosecale* Wittmack). *plants*, 10(8), 1592. <https://doi.org/10.3390/plants10081592>.
- Upreti, S., Ghimire, R. P., Singh, N., Bhandari, G., y Banskota, N. (2022). Production performance and nutrient composition of fodder Triticale (*x Triticosecale* W.). *Journal of Nepal Agricultural Research Council*, 8, 101-114. DOI: <https://doi.org/10.3126/jnarc.v8i.44871>.
- Valvo, P. J. L., Miralles, D. J., y Serrago, R. A. (2018). Genetic progress in Argentine bread wheat varieties released between 1918 and 2011: Changes in physiological and numerical yield components. *Field Crops Research*, 221, 314-321. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.014>.
- Varshney, R. K., Bohra, A., Yu, J., Graner, A., Zhang, Q., y Sorrells, M. E. (2021). Designing future crops: genomics-assisted breeding comes of age. *Trends in Plant Science*, 26(6), 631-649.  
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.03.010>.

- Varughese, G., Barker, T., y Saari, E. (1987). Triticale. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).  
<https://repository.cimmyt.org/bitstreams/727b40c5-050e-4227-b15c-cc0b5a9b69ac/download>.
- Velasco López, J. L., Soto Ortiz, R., Ail Catzim, C. E., Grimaldo Juárez, O., Avilés Marín, S. M., y Lozano del Río, A. J. (2020). Rendimiento de biomasa y grano en variedades de triticale en el valle de Mexicali. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(5), 1097-1109.  
<https://doi.org/10.29312/remexca.v11i5.2293>.
- Velasco-López, J. L., Ruiz-Torres, N. A., Sosa-Flores, M. A., Ail-Catzim, C. E., y Sánchez-Ramírez, F. J. (2025). Evaluación del rendimiento de grano de 55 líneas de triticale en el Valle de Mexicali. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16 (1).<https://doi.org/10.29312/remexca.v16i1.3522>.
- Yan, W., y Tinker, N. A. (2006). Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Canadian Journal of Plant Science*, 86(3), 623–645. <https://doi.org/10.4141/P05-169>.
- Yan, W., y Holland, J. B. (2010). A heritability-adjusted GGE biplot for test environment evaluation. *Euphytica*, 171(3), 355-369.  
<https://doi.org/10.1007/s10681-009-0030-5>.