

4. Efecto de la fertilización nitrogenada y del genotipo sobre el contenido de compuestos prebióticos del Triticale (*X Triticosecale* sp. Wittmack)



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.299.04>

GASPAR ESTRADA CAMPUZANO*§

CELIA CRUZ-VÁZQUEZ**

ADRIANA VILLANUEVA CARVAJAL***

JOSÉ RAMÓN PASCUAL FRANCO MARTÍNEZ****

DELFINA DE JESÚS PÉREZ LÓPEZ*****

CARLOS GUSTAVO MARTÍNEZ RUEDA*****

Resumen

El triticale contiene cantidades relativamente elevadas de fibra dietética, particularmente de arabinosilanos (AX) y de β -glucanos. Esto limita su empleo en la alimentación animal y en algunos procesos agroindustriales, pero le confiere un potencial significativo en la producción de alimentos prebióticos. El propósito de este trabajo fue evaluar el efecto del genotipo y de la dosis de nitrógeno (N) aplicada durante el cultivo, sobre la concentración de fibra dietética prebiótica en el grano. Para tal efecto, se sembraron dos variedades comerciales, Bicentenario y Siglo XXI, y dos líneas avan-

La autora Celia Cruz Vázquez agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (Conahcyt Beca: 615778) por la beca que le permitió realizar sus estudios de Maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales.

§ Autor para correspondencia: gestradac@uaemex.mx

* Doctor en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1189-0470>

** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México.

*** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2429-4387>

**** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2139-6203>

***** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesora de tiempo completo de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1621-5690>

***** Doctor en Ciencias. Profesor de tiempo completo de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9644-5757>

zadas de triticale y los tratamientos de fertilización consistieron en 00, 120, 180 y 240 kg N ha⁻¹. Al grano cosechado se le cuantificó la fibra soluble, insoluble, los AX y los β-glucanos, además del rendimiento y algunos de sus componentes. Los resultados mostraron que el aumento de la dosis de N produjo un incremento proporcional del rendimiento de grano a razón de 933 kg ha⁻¹ por cada 60 unidades de N aplicadas ($R^2 > 0.99$). El número de granos también se incrementó de manera similar, pero a razón de 1762 granos m⁻² ($R^2 > 0.98$) y el peso individual aumentó solamente a partir de 180 kg ha⁻¹. El rendimiento se explica mejor por el número de granos obtenido por superficie que por el peso individual de los mismos. En línea con el incremento en el rendimiento, el tiempo térmico a antesis se alargó con la dosis de N, sin importar el genotipo, obteniéndose los valores más altos a 240 kg ha⁻¹. La composición prebiótica del triticale también se modifica por la dosis de N. Se observaron incrementos significativos a partir de 120 kg ha⁻¹. La mayor parte de la variabilidad en el contenido de las fibras insoluble y total se explica principalmente por las diferentes dosis de N; pero las variaciones en la fibra soluble, β-glucanos y AX se debieron a los efectos conjuntos de la dosis de N, del genotipo y de su interacción. Se sugiere que un alargamiento de las etapas del cultivo, por efecto de la dosis de N, explicaría el incremento de la concentración de compuestos prebióticos en el grano de este cereal.

Palabras clave: *dosis de Nitrógeno, β-glucanos, arabinosilanos, fibra dietética.*

Introducción

El triticale (*x Triticosecale* sp. Wittmack ex A. Camus 1927) (Stace, 1987) por su valor nutritivo, y tolerancia a condiciones ambientales desfavorables puede ser una alternativa para la producción agrícola en regiones de baja precipitación pluvial y suelos pobres. Planta desarrollada con el fin de producir grano para la alimentación humana, pero la rusticidad, el rendimiento y cualidades de su biomasa la han destinado principalmente para la producción de forraje (McGoverin et al., 2011; Darvey et al., 2000).

De su harina se producen masas débiles a causa de su bajo contenido y fuerza de gluten y a su alta actividad amilolítica (Mergoum et al., 2004; Glatthar et al., 2002) y su rendimiento harinero es más bajo que el del trigo (Dennett y Trethowan, 2013). Se ha propuesto como sustituto parcial del maíz (Vaca-García et al., 2011) o trigo (Serna-Saldívar et al., 2004) para la elaboración de tortillas; pero, su alta actividad α -amilásica y su elevado contenido de polifenoles y cenizas hacen que este tipo de productos sean relativamente dulces y con una coloración no convencional cuando la concentración de harina de triticale rebasa 25%.

Se puede producir cerveza de una calidad comparable a la obtenida usando trigo, pero a menor costo porque es posible evitar el uso de malta u otros ingredientes destinados a la sacarificación de los almidones (Glatthar et al., 2005). En el endospermo, el contenido de amilosa es relativamente elevado (McGoverin et al., 2011), así como su concentración de fibra dietética (FD) soluble e insoluble (Rakha et al., 2011). La primera está conformada por oligosacáridos del tipo de los arbinosilanos (hasta 7.5% m. s.) y β -glucanos (hasta 1.0% m. s.) y la segunda básicamente por celulosas y hemicelulosas (Agil y Hosseinian, 2012). Este hecho limita su uso en la alimentación animal ya que el alto contenido de FD soluble aumenta la viscosidad y la retención de agua en el tracto gastrointestinal de los animales monogástricos y disminuye la absorción de nutrientes. Otros componentes importantes son los polifenoles y los compuestos derivados del ácido fítico, los cuales en general disminuyen la disponibilidad de las proteínas de los alimentos balanceados (McGoverin et al., 2011), además se pueden encontrar ligados a la FD (Agil y Hosseinian, 2012).

La elevada concentración de FD, compuestos polifenólicos y derivados del ácido fítico y su alta actividad amilolítica, le confieren a este cereal un potencial significativo como alimento prebiótico y funcional. Es decir, como un producto natural que además de proveer de nutrimentos, ayudaría a contrarrestar los efectos del estrés, del envejecimiento y en general del deterioro del cuerpo humano, o en algunos casos reducir sustancialmente el riesgo de contraer enfermedades como el cáncer. Esto se debe a que su consumo cotidiano podría estimular el desarrollo de bacterias benéficas como *lactobacilli* y *bifidobacteria* en el tracto gastrointestinal y en

consecuencia, protegerlo de estas enfermedades (Vardakou et al., 2008; Agil y Hosseinian, 2012).

El consumo de FD, a través de una alimentación rica en vegetales es relativamente bajo. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) aun cuando no se ha definido una ingesta dietética de referencia de estos nutrientes, una manera conveniente de incorporarlos en una dieta regular es incluir al menos cinco porciones (80 g cada una) de frutas y verduras por día. Esta meta sólo es alcanzada por una minoría de la población mundial, problema particularmente importante en núcleos sociales de bajos ingresos en países subdesarrollados (Villanueva Carvajal et al., 2013). Una alternativa viable para satisfacer las necesidades de la población es la incorporación de estos nutrientes en la dieta a través de productos alimenticios enriquecidos con extractos que hayan sido obtenidos mediante cultivos agrícolas extensivos. Estos cultivos, como es el caso del triticale, pueden sintetizar FD en cantidades superiores a las de las frutas y verduras convencionales cultivadas en ambientes similares y en un período de tiempo más corto.

La composición del grano de triticale, el rendimiento y sus componentes están influenciados por el ambiente, el genoma y la nutrición de la planta (Mendoza-Elos et al., 2011). Un estrés hídrico moderado durante el desarrollo del grano provoca una reducción en el contenido y variaciones en la morfología del gránulo de almidón (Bechtel et al., 1990); además, incrementa la acumulación de amilosa, disminuye en consecuencia la concentración de amilopectina (He et al., 2012).

El incremento de nitrógeno en el suelo, incrementa la cantidad de proteína en el grano y mejora su morfología y rendimiento (Davis-Knight y Weightman, 2008). Es posible, en consecuencia, que la concentración y características de los compuestos prebióticos, como la FD en el grano también estén determinadas genotípicamente y por los factores ligados al cultivo. Aspecto poco estudiado, el uso del grano de triticale para la producción de FD tampoco ha sido estudiado ampliamente y representa una alternativa original para generar, alrededor de este cereal, un nicho de oportunidades agroindustriales que coadyuven a la vez para lograr la autosuficiencia alimentaria con respecto a los granos básicos, para ofrecer una alternativa de cultivo en las zonas agrícolas de temporal y baja precipitación pluvial y para

la producción de materias primas destinadas a la elaboración de alimentos funcionales. En este sentido, el objetivo de este trabajo fue verificar la existencia de variabilidad genética para la concentración de los compuestos prebióticos (esencialmente FD) del triticale y, al mismo tiempo, explicar estas variaciones en función de la fertilización nitrogenada y de la interacción genotipo-dosis de nitrógeno.

Materiales y métodos

Descripción del sitio experimental

El experimento se estableció, bajo temporal, durante el ciclo verano-otoño de 2014, en la Facultad de Ciencias Agrícolas (Universidad Autónoma del Estado de México), localizada al norte de la ciudad de Toluca (19°15'33" de latitud norte, 99°39'38" de longitud oeste, y una altura de 2 640 msnm) en México. El clima de esta localidad se clasifica como semifrío subhúmedo con lluvias en verano, con un rango anual de precipitación de 800 a 1 300 mm y de temperatura de 8 a 14°C. Las parcelas se establecieron en un suelo de tipo vertisol pélico con textura franco-arcillosa. Análisis preliminares mostraron que el pH del suelo fue igual a 6.6, con 6.7% de materia orgánica, 35 kg ha⁻¹ de N, 123 ppm de P y 564 ppm de K. Según la determinación de la fertilidad del suelo de la Nom-021-Semarnat-2000 (2002), este se clasifica como neutro, con niveles medios de materia orgánica y nitrógeno inorgánico, y niveles altos de fósforo y potasio.

Actividades de campo y tratamientos

Previo a la siembra, la semilla se colocó en cintas de papel biodegradable a una distancia equidistante de 1.5 cm con el fin de garantizar el stand de plantas requerido. La siembra se llevó a cabo manualmente colocando las cintas en el fondo del surco y a una densidad de 336 semillas m⁻². La parcela experimental consistió de seis hileras de 4 m de largo separadas a 0.20 m (3.6 m²). Se consideró como parcela útil para mediciones un área de 0.4 m²

formada por dos hileras centrales de 1 m de longitud. Las malezas se controlaron manualmente durante todo el ciclo del cultivo. No se presentaron plagas o enfermedades en el cultivo durante el periodo de crecimiento. Se utilizaron dos variedades comerciales, Bicentenario y Siglo XXI, y dos líneas avanzadas de triticales hexaploides (línea 3 y 7). Los tratamientos de nitrógeno (N) consistieron de 00, 120, 180 y 240 kg de N por hectárea. Se utilizó urea (46% N), superfosfato de calcio triple (46% P_2O_5) y Cloruro de Potasio (60% K_2O). Las dosis de N señaladas se aplicaron en siembra (s), amacollamiento (AM) y hoja bandera (HB) según la dosis, de tal forma que la de 120 fue aplicada en s y AM, 180 y 240 en s, AM y HB. En cada dosis de N, los cuatro cultivares fueron distribuidos en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones.

Cosecha y análisis de grano

La cosecha se realizó de forma manual a los 164 días después de la emergencia. Se cosecharon las plantas en 1 m lineal de los dos surcos centrales en cada unidad experimental. Las espigas presentes fueron secadas en una estufa de aire forzado a 60°C por 72 horas. Con el grano obtenido en la muestra se determinó el rendimiento de grano (REND, $g\ m^{-2}$), número de granos por m^2 (NG) y peso individual de grano (PIG, $mg\ grano^{-1}$).

A cada muestra de grano se le determinó su composición prebiótica, es decir, el contenido de β -glucanos, fibra dietética total, soluble e insoluble mediante el kit enzimático K-TDFR adquirido en Megazyme (Megazyme International Ireland Limited) (Hollmann et al., 2013) y los arabinosilanos a través del método colorimétrico de Kiszonas et al. (2012). Con los datos obtenidos se practicó un análisis de varianza (ANOVA) de acuerdo al modelo lineal utilizado y se realizó la comparación de las medias de Tukey, con la ayuda del software Statistical Analysis System (V.6.12). Para evaluar la relación entre estas variables se utilizó un análisis de componentes principales.

Resultados y discusión

Rendimiento de grano y algunos de sus componentes

En la tabla 4.1 se reportan los valores de *F* obtenidos a partir del análisis de varianza para el rendimiento (REND), el número de granos por metro cuadrado (NG), el peso individual de grano (PIG) y el tiempo térmico a antesis (TTA, en °Cd) del triticale en función de la fertilización nitrogenada y del genotipo. El efecto de la dosis de N, del genotipo y de la interacción entre estos dos factores resultó, en general, altamente significativo para las tres variables relacionadas con el rendimiento. Asimismo, el TTA solamente se vio afectado por la dosis de N ($p < 0.01$). La variabilidad observada en el REND y en el NG se explica principalmente por el efecto de la dosis de N (64.2 y 60.4%, del total de la suma de cuadrados, respectivamente), en comparación con el efecto del genotipo que sólo explica un porcentaje marginal de 9.6 y 7.9%, respectivamente. En el caso del PIG, esta variabilidad se explica esencialmente por el efecto de la interacción genotipo-dosis de N (46.7%) y por el efecto individual del genotipo (29.7%), ya que el efecto de la dosis de N solamente contribuyó con 8.9%. En lo que corresponde a la variabilidad en el TTA ésta sólo se explicó por las variaciones en la dosis de N aplicada, ya que este factor integró por sí solo 80% de la suma de cuadrados en el ANOVA.

Tabla 4.1. Valores de *F* del análisis de varianza para algunos componentes del rendimiento del triticale

Fuente de variación	GL	Rend	SC (%)	NG	SC (%)	PIG	SC (%)	TTA	SC (%)
Bloque (Nitrógeno)	8	0.36 ^{NS}	1.2	0.30 ^{NS}	1.6	0.44 ^{NS}	1.9	1.07 ^{NS}	3.72
A: Genotipo	3	7.79 ^{**}	9.6	3.98 [*]	7.9	18.56 ^{**}	29.7	0.80 ^{NS}	1.04
B: Nitrógeno	3	51.94 ^{**}	64.2	30.42 ^{**}	60.4	5.57 ^{**}	8.9	61.37 ^{**}	80.00
A*B	9	4.07 ^{**}	15.1	2.38 [*]	14.2	9.74 ^{**}	46.7	1.23 ^{NS}	4.82
Error (CM)		5869.76		3610250		3.124		128.516	
R2 (%)		90.11		84.11		87.20		89.57	

Nota. **: $p < 0.01$; *: $p < 0.05$; NS: No significativo; Rend: Rendimiento; NG: Número de granos; PIG: Peso individual de granos; TTA: Tiempo térmico a antesis; SC: Suma de Cuadrados; CM: cuadrado medio.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La comparación de medias para la dosis de N y para los genotipos en cada una de las variables que definen algunos componentes del rendimiento se muestra en la tabla 4.2. El aumento de la dosis de N produjo un incremento proporcional del REND a razón de 93.3 g m⁻² por cada 60 unidades de N aplicadas (R²>0.99). El NG también se incrementó de manera similar, pero a razón de 1761.7 granos m⁻² (R²>0.98) y en cuanto al PIG, éste aumentó 3.2% solamente a partir de la dosis de 180 kg ha⁻¹ (p<0.05). Por otra parte, aun cuando la línea 7 produjo un mayor número de granos, en los genotipos Bicentenario y línea 3 se observaron los mayores rendimientos. Esto se explica, aunque no con una alta correlación, por un mayor peso individual de los granos: la línea 7 produjo el menor PIG y uno de los rendimientos más bajos, mientras que Bicentenario y Siglo XXI mostraron los pesos individuales más elevados. De manera general, los resultados mostrados en la tabla 4.2 sugieren que, para los genotipos evaluados, el rendimiento de grano se explica mejor por el número de granos obtenido por superficie que por el peso individual de los mismos.

Tabla 4.2. Valores medios para las variables REND, NG y PIG para 4 genotipos de triticale cultivados en 4 dosis de N bajo condiciones de temporal en Toluca, México

Fuente de variación	Dosis de N	REND (g m ⁻²)	NG m ⁻²	PIG (mg)	TTA (°D)
Dosis de Nitrógeno (kg ha ⁻¹)	0	739.27 ^A	15173.9 ^A	48.83 ^{AB}	941.2A
	120	919.54 ^B	19321.5 ^B	47.65 ^A	958.8B
	180	1018.44 ^C	20382.3 ^{BC}	50.44 ^B	961.7B
	240	1111.94 ^D	22342.9 ^C	49.72 ^B	1001.8C
Genotipo	Bicentenario	1025.19 ^B	19835.7 ^{A^B}	51.35 ^C	966.0A
	Línea 3	959.48 ^{A^B}	19556.2 ^{A^B}	49.16 ^B	961.8A
	Línea 7	926.35 ^A	20127.7 ^B	46.15 ^A	967.3A
	Siglo XXI	878.17 ^A	17700.9 ^A	49.97 ^{BC}	968.4A
DSH		86.31	2140.4	1.99	

Nota. Rend: Rendimiento; NG: Número de granos; PIG: Peso individual de granos; TTA: Tiempo térmico a antesis.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

Como se puede observar en la tabla 4.2, en línea con el incremento en el rendimiento de grano, el TTA se alargó con la dosis de N independientemente del genotipo, obteniéndose los valores más altos a 240 kg ha⁻¹. Diver-

Los investigadores han reportado que la fertilización nitrogenada incrementa de manera significativa la duración de las etapas fenológicas del cultivo de los cereales (Gibson et al., 2007; Lestingi et al., 2010). Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que la etapa post-antesis, donde ocurre el desarrollo del grano, también podría haberse alargado promoviendo una mayor acumulación de compuestos de reserva y de fibra dietética.

Composición prebiótica del grano de triticale

En la tabla 4.3, se reportan los valores de *F* obtenidos a partir del análisis de varianza para las variables que definen la composición prebiótica del triticale. El efecto de bloque no resultó significativo en ningún caso; sin embargo, la dosis de N afecta, de manera altamente significativa, la concentración de cada uno de los compuestos evaluados. En cuanto al efecto del genotipo, se observó algo similar con excepción de la concentración de fibra insoluble y en lo que concierne a la interacción, genotipo-nitrógeno, ésta fue significativa sólo en la fibra dietética soluble, los β -glucanos y los arabinosilanos.

Tabla 4.3. Valores de *F* del análisis de varianza para la composición prebiótica del triticale (entre paréntesis, porcentaje de la suma de cuadrados total)

Fuente de variación	GL	Fibra dietética						AX	SC (%)	β -Gluc	SC (%)
		Insoluble	SC (%)	Soluble	SC (%)	Total	SC (%)				
Bloque (Nitrógeno)	8	0.12 ^{NS}	0.8	1.21 ^{NS}	2.5	0.08 ^{NS}	0.3	0.38 ^{NS}	3.2	0.53 ^{NS}	4.2
A: Genotipo	3	0.58 ^{NS}	1.4	42.09**	33.1	4.76**	7.2	10.11**	32.3	6.28**	18.5
B: Nitrógeno	3	28.21**	66.6	47.41**	37.3	47.55**	71.7	4.85**	15.5	6.63**	19.5
A*B	9	1.74 ^{NS}	12.3	8.84**	20.8	1.92 ^{NS}	8.7	2.43*	23.3	3.88**	34.3
Error (CM)		0.405		0.021		0.363		0.330		0.015	
R2 (%)		81.10		93.71		87.93		74.42		76.46	

Nota: **: $p < 0.01$; *: $p < 0.05$; NS: No significativo; AX: Arabinosilanos; β -Gluc: β -Glucanos; SC: Suma de Cuadrados; CM: cuadrado medio.

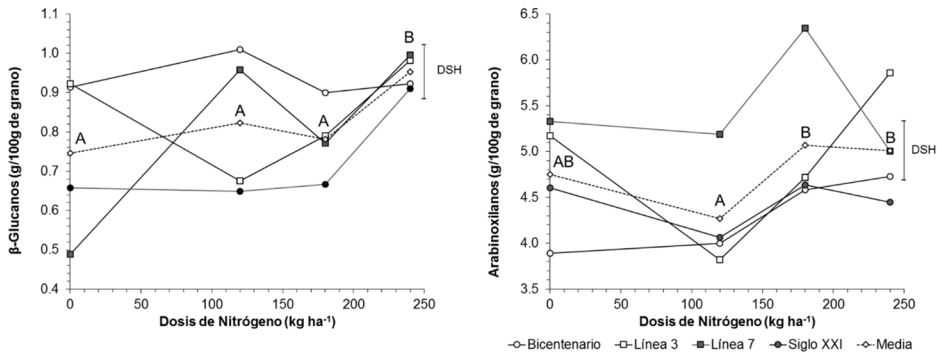
Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La mayor parte de variabilidad en la concentración de las fibras insoluble y total (66.6 y 71.7% de la suma de cuadrados total, respectivamente) se

explica principalmente por las diferentes dosis de N aplicadas; pero las variaciones en el contenido de fibra soluble, β -glucanos y arabinosilanos se debió a los efectos conjuntos de la dosis de N, del genotipo y de la interacción entre estos dos factores, como se puede ver en la distribución respectiva del porcentaje de la suma de cuadrados mostrada en la tabla 4.3.

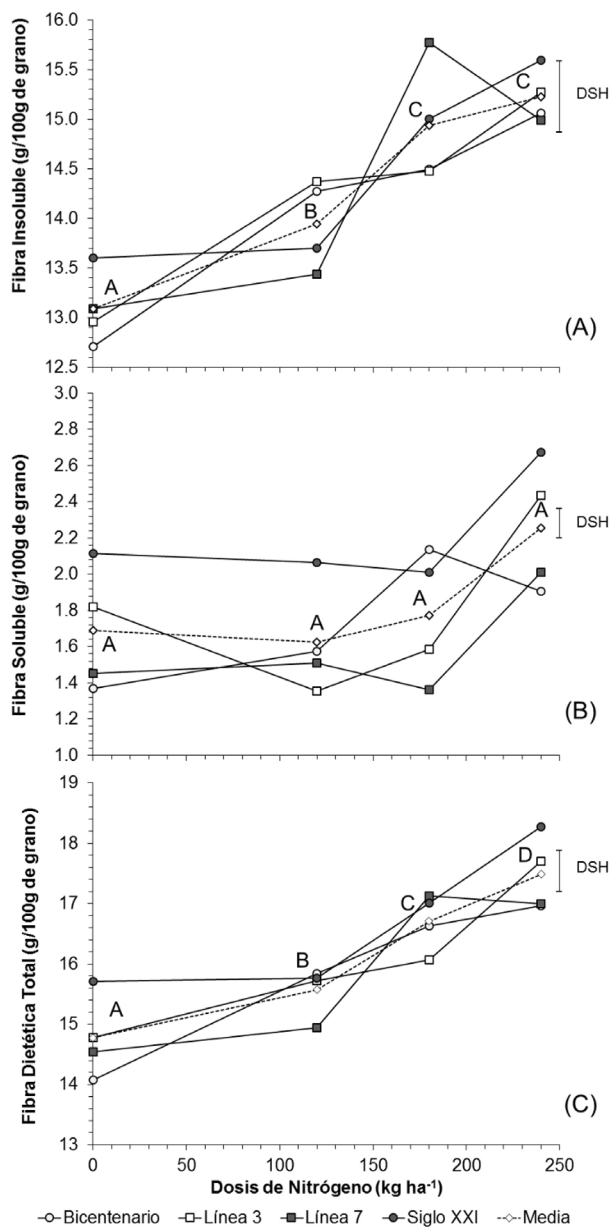
Las gráficas 4.1 y 4.2 muestran los valores medios de la composición prebiótica del triticale e ilustran la interacción genotipo-dosis de N. Estas gráficas y los resultados del análisis de varianza mostrado en la tabla 4.3, ponen de manifiesto que cada genotipo responde de manera diferente a la fertilización nitrogenada. Por ejemplo, en el caso de la concentración de β -glucanos, mientras que los granos de la variedad Bicentenario incrementaron ligeramente su contenido de este compuesto cuando se les aplicó una dosis de 120 kg ha⁻¹, la línea 3 decreció y la variedad Siglo XXI no manifestó respuesta alguna. Además, la concentración de este prebiótico en la línea 7 aumentó significativamente. En este sentido, el efecto medio, mostrado en líneas punteadas, indica que sólo la dosis de 240 kg ha⁻¹ provoca un aumento significativo en este compuesto. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Güler (2003), quien encontró que altos niveles de N aumentaban significativamente el contenido de β -glucanos en la cebada y por Noworolnik et al. (2014), quienes, además, reportaron que las variaciones en el contenido de fibra insoluble en la cebada no dependían de la fertilización nitrogenada.

Gráfica 4.1. Interacción genotipo por dosis de N para la concentración de β -glucanos y arabinosilanos del grano de triticale (DHS: Diferencia significativa honesta)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

Gráfica 4.2. Interacción genotipo por dosis de N para la concentración de fibra dietética insoluble, soluble y total del grano de triticale (DHS: Diferencia significativa honesta)



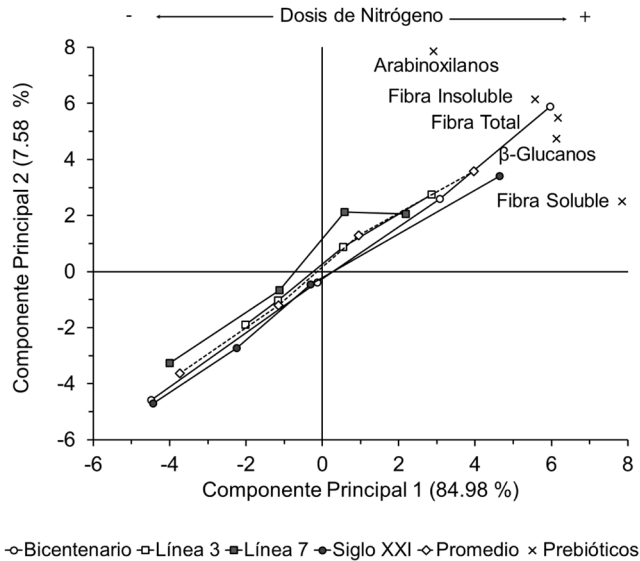
Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

Así como en el caso del rendimiento, las fibras dietéticas total, soluble e insoluble promedio, aumentan con el incremento en la dosis de N. Este comportamiento medio es diferente en el caso de los β -glucanos y los arabinosilanos; en este caso, la respuesta es evidente sólo a concentraciones elevadas del fertilizante. De acuerdo con estos resultados, aunque la concentración de β -glucanos es afectada por factores ambientales (en este caso, la dosis de N), está principalmente asociada con el genotipo.

En el grano, las paredes celulares cumplen con muchas funciones fisiológicas. Por ejemplo, proporcionan la estructura de sostén para los tejidos y la cohesividad intercelular que mantiene la integridad de este (Guillon et al., 2011). Aunque están presentes en pequeñas cantidades en el endospermo, tienen efectos importantes cuando el grano se convierte en harina para diferentes procesos agroindustriales (molienda, horneado y uso de piensos) y, en tanto que fibra dietética, mejoran la calidad nutricional de los alimentos derivados. De acuerdo con Philippe et al. (2006), en los cereales, las paredes de las células endospermáticas consisten principalmente en AX y β -glucanos, con sólo niveles bajos de celulosa y otros compuestos. Durante las diversas etapas de desarrollo post-antesis, tanto los β -glucanos como los arabinosilanos se van depositando en las paredes celulares del endospermo y se mantienen ahí hasta la madurez fisiológica. Los β -glucanos comienzan a depositarse a partir de que se forman las primeras paredes celulares (alrededor de 45°Cd post-antesis) y continúan acumulándose hasta la maduración del grano. Por su parte, los AX comienzan a depositarse más tarde, cuando inicia la etapa de diferenciación celular y comienza a formarse la capa de aleurona (cerca de 245°Cd). Esto sugiere que un alargamiento de las etapas post-antesis pudiera dar oportunidad de promover una mayor acumulación tanto de β -glucanos como de arabinosilanos en el endospermo. En este estudio se observó que la dosis de N provoca un incremento del período pre-antesis, lo que sugiere que la etapa post-antesis también se alargó, lo que explicaría el incremento significativo de estos compuestos en el grano de triticale.

Cuando se sintetiza el conjunto de variables que definen la composición prebiótica en un espacio bidimensional y, además, cada una de ellas se expresa en términos de producción de compuestos prebióticos por hectárea de cultivo, entonces se observa una tendencia clara a aumentar en función

Gráfica 4.3. Análisis de componentes principales de la composición prebiótica del grano de triticale y su relación con la dosis de N



Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

de la dosis de N aplicada. La gráfica 4.3 muestra el análisis de componentes principales de las variables estudiadas y su relación con la dosis de N. El componente principal 1 agrupa 84.98% de la varianza, mientras que el 2, 7.58% residual. En general, se observa que los dos primeros puntos de cada uno de los genotipos que fueron cultivados, y que representan la dosis de 0 y de 120 kg de N ha⁻¹, se sitúan en el cuadrante inferior izquierdo. Esto significa que los niveles de la composición prebiótica están por debajo de la media general (o sea, los ejes que definen los componentes principales). Por otro lado, los dos últimos puntos, que constituyen las dosis de 180 y 240 kg de N ha⁻¹ para cada genotipo, se sitúan en el cuadrante superior derecho. Al contrario que en el caso anterior, esta posición indica concentraciones de los compuestos prebióticos evaluados superiores a la media general. En esta gráfica también se pone en evidencia que las variedades Bicentenario y Siglo XXI respondieron mejor a las dosis de N que las dos líneas avanzadas. Los dos últimos puntos de la Línea 7, por ejemplo, son los más cercanos a la intersección de los dos componentes principales. La fertilización nitroge-

nada incrementa de manera significativa la cantidad de compuestos prebióticos producida por hectárea y aunque algunos genotipos, como Bicentenario, responden mejor a este factor, el efecto genotípico no es tan notorio porque, en general, el rendimiento aumenta con la dosis de N.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, el rendimiento de grano aumenta de manera lineal con la dosis de N, aunque cada genotipo responde de manera diferente a este factor. Este parámetro del cultivo se explica mejor por el número de granos obtenido por superficie que por el peso individual de los mismos. En línea con el incremento en el rendimiento, el tiempo térmico a antesis también se alargó con la dosis de N, sin importar el genotipo. Esto sugiere que un alargamiento de las etapas del cultivo también explicaría el incremento de la concentración de compuestos prebióticos en el grano. En efecto, la composición prebiótica del triticale también se modifica por la dosis de N ya que se observaron aumentos significativos a partir de 120 kg ha⁻¹. La mayor parte de la variabilidad en el contenido de las fibras insoluble y total se explica principalmente por este factor; aunque las variaciones en la fibra soluble, β -glucanos y AX se debieron a los efectos conjuntos de la dosis de N, del genotipo y de su interacción.

Referencias

- Agil, R., y Hosseinian, F. (2012). Dual Functionality of Triticale as a Novel Dietary Source of Prebiotics with Antioxidant Activity in Fermented Dairy Products. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67, 88-93.
- Bechtel, D. B., Zayas, I. Y., Kaleikau, L., y Pomeranz, Y. (1990). Size-distribution of wheat starch granules during endosperm development. *Cereal Chemistry*, 67, 59-63.
- Darvey, N. L., Naeem, H., y Gustafson, J. P. (2000). Triticale: Production and utilization. En K. Kulp y J. Ponte (Eds.), *Handbook of Cereal Science and Technology* (2ª ed., pp. 257-271). Marcel Dekker.
- Davis-Knight, H. R., y Weightman, R. M. (2008). *The potential of triticale as a low input cereal for bioethanol production*. Project Report No. 434. The Home-Grown Cereals Authority. ADAS UK Ltd, Centre for Sustainable Crop Management.

- Dennett, A. L., y Trethowan, R.M. (2013). Milling efficiency of triticale grain for commercial flour production. *Journal of Cereal Science*, 57, 527-530.
- Gibson, L., Nance, C., y Karlen, D. (2007). Winter triticale response to nitrogen fertilization when grown after corn or soybean. *Agronomy Journal*, 99, 49-58.
- Glatthar, J., Heinisch, J. J., y Senn, T. (2002). A study on the suitability of unmalted triticale as a brewing adjunct. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 60, 181-187.
- Glatthar, J., Heinisch, J. J., y Senn, T. (2005). Unmalted triticale cultivars as brewing adjuncts: effects of enzyme activities and composition on beer wort quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85, 647-654.
- Guillon, F., Bouchet, B., Jamme, F., Robert, P., Quémener, B., Barron, C., Larré, C., Dumas, P., y Saulnier, L. (2001). Brachypodium distachyon grain: characterization of endosperm cell walls. *Journal of Experimental Botany*, 62, 1001-1015.
- Güler, M. (2003). Barley grain β -glucan content as affected by nitrogen and irrigation. *Field Crops Research*, 84, 335-340.
- He, J.-F., Goyal, R., Laroche, A., Zhao, M.-I., y Lu, Z.-X. (2012). Water stress during grain development affects starch synthesis, composition and physicochemical properties in triticale. *Journal of Cereal Science*, 56, 552-560.
- Hollmann, J., Themeier, H., Neese, U., y Lindhauer, M. G. (2013). Dietary fibre fractions in cereal foods measured by a new integrated AOAC method. *Food Chemistry*, 140, 586-589.
- Kiszonas, A. M., Courtin, C. M., y Morris, C. F. (2012). A Critical assessment of the quantification of wheat grain arabinoxylans using a phloroglucinol colorimetric assay. *Cereal Chemistry*, 89, 143-150.
- Lestingi, A., Bovera, F., De Giorgio, D., Ventrella, D., y Tateo, A. (2010). Effects of tillage and nitrogen fertilisation on triticale grain yield, chemical composition and nutritive value. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90, 2440-2446.
- Mcgoverin, C. M., Snyders, F., Muller, N., Botes, W., Fox, G., y Manley, M. (2011). A review of triticale uses and the effect of growth environment on grain quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91, 1155-1165.
- 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, 309-316.
- Mergoum, M., Pfeiffer, W. H., Peña, R. J., Ammar, K., y Rajaram, S. (2004). Triticale crop improvement: the CIMMYT programme. En M. Mergoum y H. Gómez-Macpherson (Eds.), *Triticale Improvement and Production* (pp. 11-22). FAO Plant Production and Protection Paper 179.
- NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002). *Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. Diario Oficial (Segunda Sección).

- Noworolnik, K., Wirkijowska, A., y Mikos-Szymanska, M. (2014). Effect of genotype and nitrogen fertilization on grain yield and quality of spring barley intended for health food use. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 20, 576-580.
- Philippe, S., Saulnier, L., y Guillon, F. (2006). Arabinoxylan and (1-3),(1-4)- β -glucan deposition in cell walls during wheat endosperm development. *Planta*, 224, 449-461.
- Rakha, A., Aman, P., y Andersson, R. (2011). Dietary fiber in triticale grain: Variation in content, composition, and molecular weight distribution of extractable components. *Journal of Cereal Science*, 54, 324-331.
- Serna-Saldivar, S. O., Guajardo-Flores, S., y Viesca-Rios, R. (2004). Potential of triticale as a substitute for wheat in flour tortilla production. *Cereal Chemistry*, 81, 220-225.
- Stace, C. A. (1987). Triticale: a case of nomenclatural mistreatment. *Taxon*, 36, 445-452.
- Vaca-García, V. M., Martínez-Rueda, C. G., Mariezcurrena-Berasain, M. D., y Domínguez-López, A. (2011). Functional Properties of Tortillas with Triticale Flour as a Partial Substitute of Nixtamalized Corn Flour. *LWT - Food Science and Technology*, 44, 1383-1387.
- Vardakou, M., Nueno Palop, C., Christakopoulos, P., Faulds, C. B., Gasson, M. A., y Nabad, A. (2008). Evaluation of the prebiotic properties of wheat arabinoxylan fractions and induction of hydrolase activity in gut microflora. *International Journal of Food Microbiology*, 123, 166-170.
- Villanueva-Carvajal, A., Domínguez-López, A., Bernal-Martínez, L. R., y Díaz-Bandera, D. (2013). Hibiscus sabdariffa L. confectionery gels, in vitro digestion, antioxidant activity and phenolic compounds quantification: a nutraceutical application. *International Journal of Food Science and Technology*, 48, 2659-2667.