

3. Influencia de la fertilización nitrogenada y del genotipo sobre la concentración de compuestos polifenólicos totales y la capacidad antioxidante en grano de triticale (*x Triticosecale* sp. Wittmack)



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.299.03>

ADRIANA VILLANUEVA CARVAJAL*§
JOSÉ ARTURO RODRÍGUEZ-ÁLVAREZ**
GASPAR ESTRADA CAMPUZANO***
MARTÍN RUBÍ ARRIAGA****
DELFINA DE JESÚS PÉREZ LÓPEZ*****

Resumen

El consumo de cereales integrales contribuye a mejorar la salud humana por el aporte considerable de compuestos antioxidantes, como los polifenoles, y la fibra dietética. 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 los compuestos polifenólicos del triticale y su consecuente actividad antioxidante. Para tal efecto, se sembraron dos variedades comerciales: Bicentenario y Siglo XXI; dos líneas avanzadas de triticale, y los tratamientos de fertilización consistieron en 00, 120, 180 y 24 kg N ha⁻¹. Al grano cosechado se le cuantificaron los polifenoles totales, la fibra dietética, los arabinoxilanos (AX), además de la actividad antioxi-

El autor José Arturo C. Rodríguez Álvarez desea agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (Conahcyt) por la beca que le permitió realizar sus estudios de Maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales en la Universidad Autónoma del Estado de México.

§ Autor para correspondencia: avillanuevac@uaemex.mx

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

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

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

**** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7547-5017>

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

dante del grano integral y del rendimiento. El aumento de la dosis de N produjo un incremento proporcional del rendimiento de grano a razón de 15.6 kg ha^{-1} por unidad de N aplicada ($R^2 > 0.99$). El contenido de AX se incrementa también, pero solamente a dosis de N iguales o superiores a 180 kg ha^{-1} y con respuestas diferentes según el genotipo. La concentración de polifenoles totales y la actividad antioxidante del grano siguen un comportamiento cercano al de los AX: se verificaron incrementos significativos de estas variables sólo a las dosis de N más elevadas. Se observó una asociación entre los AX y los polifenoles totales, así como entre la concentración de fibra dietética y la actividad antioxidante. El efecto de la dosis de N sobre los compuestos que le otorgan capacidad antioxidante al grano podría explicarse por el incremento en su contenido de polisacáridos y fibra dietética en general.

Palabras clave: *dosis de Nitrógeno, FRAP, equivalentes ácido gálico, capacidad antioxidante.*

Introducción

El triticale (*x Triticosecale* sp. Wittmack) es un cereal que en la actualidad se cultiva principalmente para la producción de forrajes y en menor medida para la obtención de grano. Es una planta que, cuando se desarrolla bajo condiciones ambientales no óptimas, produce una cantidad de biomasa y un rendimiento de grano que pueden ser económicamente rentables (Estrada-Campuzano et al., 2008). El empleo de este cereal en procesos agroindustriales convencionales, tales como la panificación, donde se coloca en competencia con el trigo, no han resultado conveniente (McGoverin et al., 2011). Sin embargo, en procesos alternativos, en los que se pueda aprovechar su composición y algunas de sus propiedades, puede representar una alternativa competitiva que coadyuve en la solución de problemas relacionados con la alimentación humana. Numerosos estudios han reportado que el consumo de cereales integrales contribuye a mejorar la salud por el aporte considerable de compuestos antioxidantes, tales

como los polifenoles, la fibra dietética y aun la asociación entre estos dos grupos de compuestos.

Los cereales integrales contribuyen a prevenir y atenuar problemas relacionados con la obesidad, las enfermedades coronarias, la diabetes, los desórdenes gastrointestinales y el cáncer de colon, entre otros (Tungland y Meyer, 2002; Saura-Calixto et al., 2009). Un factor que favorece la manifestación de muchos de estos desórdenes son los radicales libres, producidos por el cuerpo humano de manera natural o a causa de factores ambientales adversos, y los polifenoles de los cereales amortiguan su efecto porque presentan una capacidad antioxidante considerable (Saura-Calixto, 2011). En el grano de triticale el contenido de ácidos fenólicos, principalmente ácido ferúlico, oscila entre 65.2 y 252.5 mg 100 g⁻¹ y generalmente se encuentran presentes ligados a la fibra dietética. Esta asociación les permite expresar una alta actividad antioxidante aun superior que los ácidos fenólicos libres; además, su pericarpio contiene cantidades apreciables de proantocianidinas (862.5 mg 100 g⁻¹ de equivalentes catequina) y ligninas ligadas a otros compuestos fenólicos (0.27 mg 100 g⁻¹) (Hosseinian y Mazza, 2009). Según Agil y Hosseinian (2012), los extractos de polisacáridos obtenidos de esta fracción exhiben una fuerte actividad antiradicales libres (33.86 ± 2.30 μmol de equivalentes trolox g⁻¹ de pericarpio), lo que sugiere que este cereal puede ser una fuente considerable de compuestos prebióticos, por su fibra dietética, y de antioxidantes y puede ser una justificación para implementar su cultivo con la finalidad de producir grano. Además, por su resistencia a un déficit hídrico, representa una alternativa agrícola en las zonas de temporal y baja precipitación pluvial.

La composición del grano de triticale, el rendimiento y sus componentes están influenciados por el ambiente, el genoma y la nutrición de la planta (Estrada-Campuzano et al., 2012). Es posible entonces, que la concentración de los compuestos antioxidantes en el grano también esté determinada genotípicamente y por los factores ligados al cultivo. Este aspecto ha sido poco estudiado y son escasos los reportes donde se haya evaluado el efecto de algunos de ellos. Stumpf et al. (2015), por ejemplo, estudiaron la influencia de la fertilización nitrogenada sobre la concentración de compuestos fenólicos en el trigo, encontrando aumentos significativos a medida que se incrementaba la aportación de nitrógeno al

cultivo; además, observaron que la máxima concentración de estos compuestos se obtenía cuando el grano se encontraba en un estado lechoso. Por otro lado, Karamac et al. (2004) observaron variaciones en la concentración de polifenoles totales de los granos de triticale que estaban asociadas con el genotipo. Jonnala et al. (2010) por su parte, confirmaron este efecto genotípico en granos de trigo duro y de triticale de diversos cultivares. En este sentido, el objetivo de este trabajo fue verificar la existencia de variabilidad genética para la concentración de los compuestos polifenólicos del triticale y su consecuente actividad antioxidante, 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 de la Universidad Autónoma del Estado de México, localizada al norte de la ciudad de Toluca (19°15'33" de altitud norte, 99°39'38" de longitud oeste, a 2 640 msnm) en México. El clima de esta localidad es 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, llevados a cabo bajo normas oficiales, mostraron que el pH del suelo fue igual a 6.6, con 6.7% de materia orgánica, 35 kg ha⁻¹ de nitrógeno, 123 ppm de fósforo y 564 ppm de potasio.

Actividades de campo y tratamientos

Las semillas se colocaron en cintas adheribles de papel biodegradable a una distancia de 1.5 cm entre semilla y semilla con el fin de garantizar el número 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^{-1} . La parcela experimental consistió de seis hileras de 4 m de largo separadas a 0.20 m (3.6 m^2). Se consideró como parcela útil para las mediciones un área de 0.4 m^2 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 ni 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 se aplicaron en las etapas de siembra, amacollamiento y hoja bandera; la de 120 fue fraccionada en las dos primeras etapas y las de 180 y 240 en las tres. 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}) a partir del número de granos por m^2 y del peso individual de grano (mg grano^{-1}).

A cada muestra de grano, previamente triturada en un molino ciclónico hasta un tamaño de partícula inferior a 0.42 mm, se le determinó, el contenido de fibra dietética total mediante el kit enzimático K-TDFR adquirido en Megazyme (Megazyme International Ireland Limited) (Hollmann et al., 2013), los arabinosilanos (AX) a través del método colorimétrico de Kiszonas et al. (2012), la concentración de polifenoles totales, con el reactivo de Folin-Ciocalteu y mediante la propuesta de Spizzirri et al. (2009), y la actividad antioxidante, mediante el método de FRAP propuesto por Pulido et al. (2000). 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.

Extracción de compuestos fenólicos totales del grano de triticale

Con el fin de optimizar la extracción de los compuestos fenólicos del grano, mediante solventes orgánicos y agua, se probaron diferentes combinaciones de etanol, metanol (J. T. Baker) y agua desionizada, bajo un diseño de mezclas formado por 10 unidades experimentales (UE), como se observa en la tabla 3.1 (Cornell, 1981). Para tal efecto, se pesó 1 g de semillas de la variedad Bicentenario y se agregó a 10 ml de mezcla de solventes. A continuación, se agitó esta suspensión durante 2 h en un agitador magnético a temperatura ambiente y se centrifugó a 3000 rpm durante 10 minutos (1610 RCF). En seguida, el sobrenadante fue filtrado mediante un filtro de membrana de celulosa de acetato (0.45 μm de poro) y se utilizó inmediatamente para realizar la cuantificación de compuestos fenólicos totales mediante el reactivo de Folin-Ciocalteu. La concentración resultante en equivalentes de ácido gálico (miligramos de ácido gálico equivalente a 100 g de triticale) (EAG) se consideró como variable respuesta. Este procedimiento se repitió tres veces.

Resultados y discusión

Extracción de compuestos fenólicos totales del grano de triticale

El diseño experimental de mezclas ha sido propuesto, desde hace algunos años, por Cornell (1973 y 1981) y se ha empleado para resolver numerosos problemas donde los factores de estudio se pueden considerar como componentes proporcionales de una mezcla (Montgomery, 2009). La originalidad de este diseño es que estos factores no son independientes, porque la suma de las proporciones o fracciones de cada uno de ellos es siempre igual a 1 (o 100%). Una consecuencia de esta particularidad es que los

modelos matemáticos que los describen carecen de término constante (ordenada al origen).

Tabla 3.1. Mezclas porcentuales de agua, etanol y metanol y cantidad extraída de compuestos fenólicos totales del grano de triticale

Agua	Etanol	Metanol	Polifenoles Totales (mg EAG/100 g)	Desviación estándar
100	0	0	174.95	3.08
0	100	0	168.92	2.42
0	0	100	239.61	3.83
0	50	50	172.10	3.09
50	0	50	172.22	0.79
50	50	0	164.87	1.50
33.33	33.33	33.33	172.21	1.45
16.67	16.67	66.67	190.43	0.51
16.67	66.67	16.67	163.91	1.67
66.67	16.67	16.67	169.29	0.53

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

Tabla 3.2. Análisis de varianza del efecto de las mezclas de solventes orgánicos sobre los polifenoles totales del triticale

Fuente de variación	GL	SC	EE	R2
Media	1	959634.0		
Bloques	2	14.3 ^{NS}		
Mezclas unitarias	2	9314.1**	13.4	67.37
Mezclas Binarias	3	4188.1**	3.9	97.62
Mezclas ternarias	1	230.1**	2.2	99.28
Error experimental	21	99.0		
Total	30	973480.0		

Nota. **: $p < 0.01$; *: $p < 0.05$; NS: No significativo; SC: Suma de Cuadrados; EE: Error Estándar.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La tabla 3.1 muestra la capacidad de extracción de cada mezcla de los solventes orgánicos utilizados, desde las unitarias, formadas por un sólo componente, las binarias por la mezcla de dos, hasta las ternarias, constituidas por diferentes proporciones de los tres solventes. El análisis de varianza de estos resultados, mostrado en la tabla 3.2, y el modelo obtenido (tabla 3.3) permiten estimar el efecto de cada uno de los componentes sobre

la extracción de polifenoles totales del grano de triticale. Con la excepción de las repeticiones (bloques), los efectos de todas las mezclas resultaron significativos. Esto trae como consecuencia que un modelo cúbico (en este caso formado por las mezclas ternarias) presente el coeficiente de determinación (R^2) más elevado.

Los coeficientes del modelo cúbico, mostrados en la tabla 3.3, permiten estimar el efecto de una mezcla determinada sobre la cantidad de polifenoles totales extraída. De acuerdo con este modelo, la mayor contribución a la extracción estuvo dada por la mezcla unitaria de metanol, seguida de la del agua. Cualquiera de las mezclas binarias o ternarias disminuyó significativamente la cantidad de polifenoles extraída. Una mezcla formada por metanol y una cantidad marginal de agua maximiza la extracción. De esta manera, cuando se utilizó el agua hasta un porcentaje máximo de 10% y en ausencia de etanol, se logró obtener un valor estimado de 220.39 mg EAG 100g. Esta mezcla se utilizó para las extracciones posteriores, relacionadas con la fertilización nitrogenada. Una mezcla cercana, metanol (80%) y agua (20%) fue utilizada por Jonnala et al. (2010) para evaluar la cantidad de polifenoles en el salvado de trigo y triticale.

Tabla 3.3. Coeficientes del modelo cúbico para el efecto de las mezclas de solventes sobre la concentración de compuestos fenólicos totales del grano de triticale y su significancia

Parámetro	Coefficiente	Error estándar	t de Student	P
A:Agua	175.46	1.21	-	0.0000
B:Etanol	168.52	1.21	-	0.0000
C:Metanol	239.35	1.21	-	0.0000
AB	-28.04	6.10	-4.60	0.0000
AC	-139.73	6.10	-22.91	0.0000
BC	-129.98	6.10	-21.31	0.0000
ABC	281.01	40.22	6.99	0.0000

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

Rendimiento, actividad antioxidante y fibra dietética

En la tabla 3.4 se reportan las sumas de cuadrados (SC) obtenidas a partir del análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento (REND), la actividad antioxidante (FRAP y CPT) y la fibra dietética (AX y FDT) del triticale por efectos del genotipo y la dosis de nitrógeno (N), así como sus respectivos grados de libertad. El efecto de la dosis de N, del genotipo y de la interacción entre estos dos factores resultó significativo para todas estas variables, a excepción de la interacción para el contenido de polifenoles totales (CPT). La variabilidad observada en el rendimiento se explica principalmente por el efecto de la dosis de N, ya que este factor agrupó 64.2% de la SC total para esta variable, en comparación con el efecto del genotipo y la interacción que sólo explican 9.6 y 15.1%, respectivamente. La concentración de fibra dietética total (FDT) tuvo un comportamiento semejante con 71.7% de la variabilidad debida a la dosis de N, 7.2% al genotipo y 8.7% a la interacción. En el caso de los contenidos de polifenoles totales (CPT) y AX el efecto del genotipo es superior al de la dosis de N y a la interacción, ya que este agrupa, respectivamente, 52.7 y 32.3% de la suma de cuadrados en el ANOVA. Finalmente, en el caso de la actividad antioxidante (FRAP), los efectos de la interacción genotipo-dosis de N (43.5% de la SC) y de la dosis de N resultaron determinantes (32.3% de la SC) y en menor medida, el efecto individual del genotipo (11.7% de la SC).

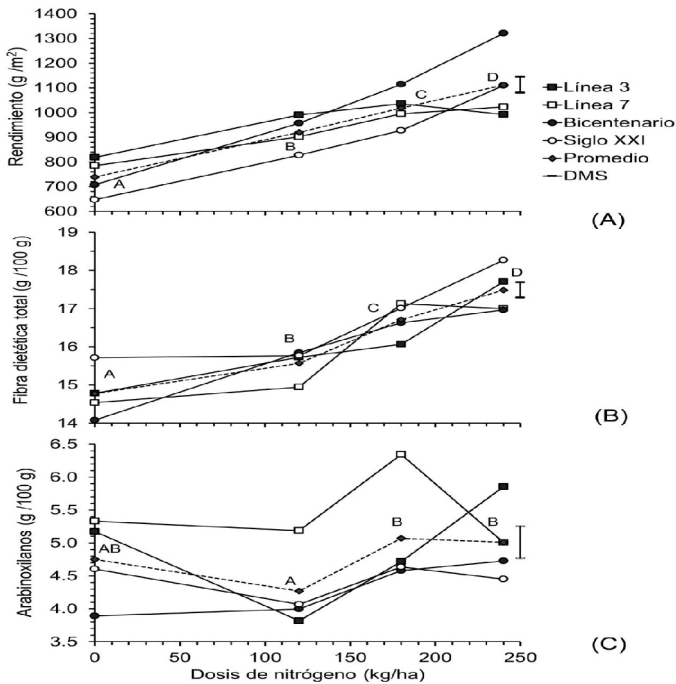
Tabla 3.4. Cuadrados medios del análisis de varianza para el rendimiento, la actividad antioxidante y la fibra dietética del triticale en función del genotipo y la dosis de nitrógeno

Fuente de variación	GL	Rendimiento	CPT	FRAP	AX	FDT
Bloque (Nitrógeno)	8	19691.40 ^{NS}	4345.34 ^{NS}	0.33 ^{NS}	0.95 ^{NS}	3.53 ^{NS}
A: Nitrógeno	3	914553.00**	8801.77**	3.46**	4.80**	51.72**
B: Genotipo	3	137195.00**	37073.30**	1.26**	9.98**	5.17**
A*B	9	214994.00**	7797.94 ^{NS}	4.67**	7.19*	6.26*
Error experimental	24	138303.00	12282.80	1.02	7.97	5.41
Total	47	1424740.00	70301.20	10.74	30.89	72.09
R2		90.29	82.53	90.53	74.19	92.49

Nota. **: p<0.01; *: p<0.05; NS: No significativo; CPT: Contenido de polifenoles totales; FRAP: Actividad antioxidante; AX: Arabinosilanos; FDT: Fibra dietética total.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

Gráfica 3.1. Interacción genotipo por dosis de N para el rendimiento y la concentración de fibra dietética total y arabinoxilanos del grano de triticale (DMS: Diferencia mínima significativa)

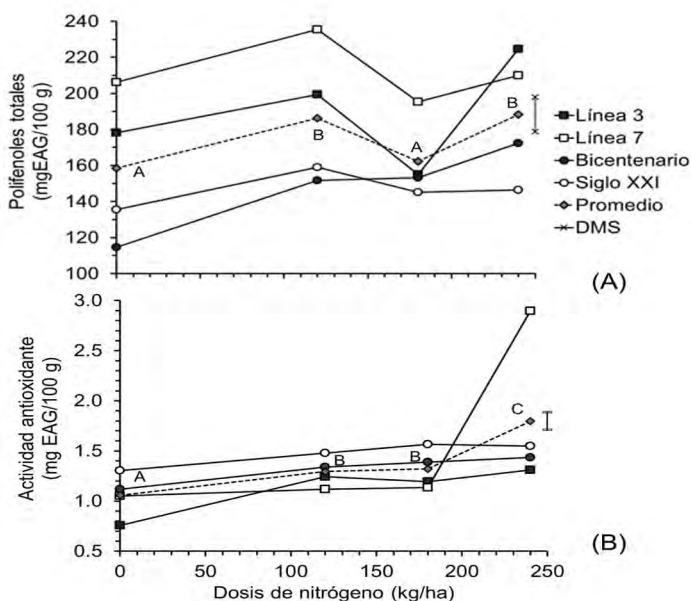


Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

El efecto individual de la dosis de N en cada genotipo y la interacción de estos dos factores para cada una de las variables antes mencionadas se muestra en las gráficas 3.1 y 3.2. El aumento de la dosis de N, en promedio, produjo un incremento proporcional del rendimiento de grano. Una regresión lineal de los valores medios (línea entrecortada de la gráfica 3.1a) reflejó que el gradiente de incremento fue de alrededor de 15.6 kg ha^{-1} por cada unidad de N aplicada ($R^2 > 0.99$) siendo la variedad Bicentenario la que mejor responde a este factor. Como se puede observar en la gráfica 3.1b, en línea con el incremento en el rendimiento de grano, la fibra dietética aumentó con la dosis de N. En relación con esto, diversos investigadores han reportado que la fertilización nitrogenada incrementa de manera significativa el rendimiento de grano y, en consecuencia, su composición (Estrada-Campuzano et al., 2012). De acuerdo con Guillon et al. (2011), en los cereales, las paredes de las células del endospermo consisten princi-

palmente en AX y otras fibras, tales como los β -glucanos o la celulosa y se forman antes de que planta comience a translocar compuestos de reserva de los tallos hacia el endospermo. Estas paredes forman el “recipiente” que contendrá todos los compuestos de reserva del grano hasta su maduración. Durante las diversas etapas de desarrollo post-antesis, los AX se van depositando en las paredes celulares del endospermo y se mantienen ahí hasta la madurez fisiológica del grano (Philippe et al., 2006).

Gráfica 3.2. Interacción genotipo por dosis de N para la concentración de polifenoles totales y actividad antioxidante del grano de triticale (DMS: Diferencia mínima significativa)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

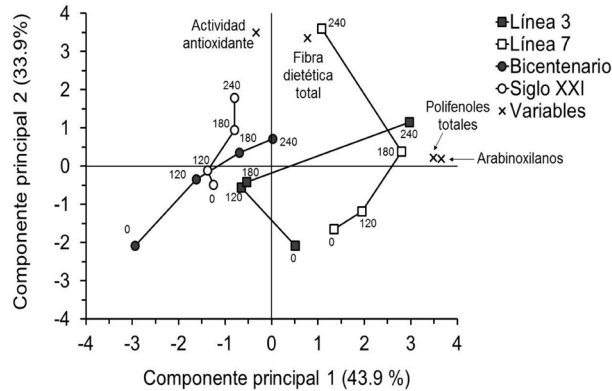
En relación con el efecto de la dosis de N sobre los AX, la gráfica 3.1c y los resultados mostrados en la tabla 3.4 ponen de manifiesto que cada genotipo responde de manera diferente a la fertilización nitrogenada. En este sentido, el efecto medio, mostrado en líneas punteadas, indica que sólo las dosis de 180 y 240 kg ha⁻¹ provocan un aumento significativo de estos compuestos. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Noworolnik et al. (2014), quienes reportaron que las variaciones en el contenido de fibra so-

luble en la cebada, incluidos los AX, no dependían de la fertilización nitrogenada sino de la interacción entre este factor y el genotipo.

La gráfica 3.2a muestra el efecto de la dosis de N sobre la concentración de polifenoles totales en el grano de triticale y pone además de manifiesto la interacción genotipo-dosis. El efecto medio indica que hubo un aumento significativo de estos compuestos únicamente a la dosis de N más elevada y cada genotipo responde de manera diferente a este factor; por ejemplo, en la variedad Bicentenario se incrementan los polifenoles prácticamente de manera lineal con la dosis de N; la variedad Siglo XXI y la línea 7 produjeron una máxima concentración con la dosis de 120 kg ha^{-1} , mientras que la línea 3 expresó este máximo a los 240 kg ha^{-1} . Stumpf et al. (2015) reportaron que los compuestos polifenólicos libres, es decir no asociados con polisacáridos que forman parte de la fibra dietética, incrementaban con la fertilización nitrogenada, en cambio aquellos conjugados o ligados a esta fibra disminuían o no respondían a los cambios en este factor. De acuerdo con los resultados mostrados en la gráfica 3.2b, la concentración de polifenoles concuerda con la actividad antioxidante del grano solamente a nivel del efecto medio. Como en el caso de la gráfica 3.2a, se observaron efectos significativos a la dosis más elevada de N, pero la respuesta individual de cada genotipo es claramente diferente. En este caso, prácticamente todos ellos van incrementando su capacidad antioxidante en la medida que aumenta la dosis de N. La única excepción es la línea 7, donde se observó un incremento drástico a la dosis de 240 kg de N ha . La capacidad antioxidante del triticale, ha sido expresada, en este estudio, como la actividad contra los radicales libres que tendría una cantidad equivalente en mg de ácido gálico por 100 g de harina integral. Los valores observados no establecen distinción entre los tipos de moléculas antioxidantes ni cómo se encontraban asociadas con otros compuestos del grano tales como la fibra dietética. McGoverin et al. (2011) reportaron que, en el triticale, los compuestos polifenólicos están comúnmente ligados con la fibra dietética y particularmente con los AX, por lo que su actividad antioxidante depende también de la cantidad que contenga el grano de estos polisacáridos.

Cuando se sintetiza el conjunto de variables (fibra dietética, polifenoles y actividad antioxidante) en un espacio bidimensional, a través del análisis de componentes principales, entonces se puede observar el efecto general

Gráfica 3.3. Análisis de componentes principales de la actividad antioxidante, los polifenoles totales, la fibra dietética total y los arabinosidos del grano de triticale y su relación con la dosis de N (los números asociados a cada punto indican la dosis de N en kg ha^{-1})



Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

de la dosis de N aplicada y el desempeño de cada genotipo. La gráfica 3.3 muestra el análisis de componentes principales de las variables estudiadas y su relación con la dosis de N. El componente principal 1 agrupa 43.9% de la varianza, mientras que el 2, 33.9% residual. Como se puede observar en esta gráfica, existe una relación entre los AX y los polifenoles totales del grano, puesto que ambas variables se encuentran altamente correlacionadas con el componente principal 1. Además, la actividad antioxidante se asocia con el contenido de fibra dietética total, dado que estas variables se correlacionan, en gran medida, con el componente principal 2. En términos generales, este análisis sugiere, que en la medida en que se incrementa el contenido de AX, aumentan también los polifenoles totales y que la actividad antioxidante, al estar asociada con la fibra dietética, refleja la concentración de polifenoles y de otros compuestos antioxidantes, tales como los fitatos (McGoverin et al., 2011) que se encuentran asociados con polisacáridos diferentes de los AX (β -glucanos, ligninas, celulosas, etc.). Por otro lado, en este análisis integral se distingue la manera en que cada genotipo modificó el contenido de estos compuestos en función de la dosis de N aplicada. Todo punto que se encuentre en el cuadrante superior derecho de la gráfica 3.3 indica que el genotipo, con su respectiva dosis de N, presentó los valores más elevados tanto de fibra dietética y AX como de polifenoles

totales y actividad antioxidante. Así, por ejemplo, la variedad Bicentenario incrementó, de manera prácticamente lineal, el contenido de todos estos compuestos y de la actividad antioxidante a medida en que se aumentaba la dosis de N. La respuesta de la línea 3.3 es evidente sólo con la dosis de 240 kg de N ha⁻¹, en donde se observó el contenido más elevado de polifenoles totales y de AX, mientras que la línea 7 tiene el mismo efecto, pero con los niveles más altos de fibra dietética y actividad antioxidante. Finalmente, este análisis sugiere que existe una relación entre la actividad antioxidante, los polifenoles y los polisacáridos que forman la fibra dietética en el triticale y que la dosis de N, al provocar el incremento de la fibra dietética, por ejemplo, promueve también el aumento de los compuestos con función antioxidante. Esta relación ha sido explicada por diversos autores por el grado reacción fisicoquímica entre la fibra dietética y los compuestos con capacidad antioxidante (Jonjala et al., 2010; Saura-Calixto et al., 2009) y por las funciones que tienen estos compuestos en la planta: esencialmente la neutralización de los radicales libres, producidos a consecuencia de los rayos ultravioleta, para proteger el DNA (Stumpf et al., 2015).

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, el rendimiento de grano, así como la concentración de fibra dietética aumentan de manera lineal con la dosis de N, aunque cada genotipo responde de manera diferente a este factor. El contenido de AX se incrementa también, pero solamente a dosis de N iguales o superiores a 180 kg ha⁻¹ y con respuestas diferentes según el genotipo. La concentración de polifenoles totales y la actividad antioxidante del grano siguen un comportamiento cercano al de los AX: se verificaron incrementos significativos de estas variables sólo a las dosis de N más elevadas. Se observó una asociación entre los AX y los polifenoles totales, así como entre la concentración de fibra dietética y la actividad antioxidante. En este sentido, el efecto de la dosis de N sobre los compuestos que le otorgan capacidad antioxidante al grano podría explicarse por el incremento en su contenido de polisacáridos y fibra dietética en general. Una fertilización incrementada en N coadyuvaría a la produc-

ción de un cultivo de triticale que, además de producir un rendimiento económicamente rentable, poseyera mejores propiedades como alimento funcional prebiótico, por su contenido de fibra dietética, y antioxidante, por su nivel de compuestos polifenólicos.

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.
- Cornell Jhon, A. (1973). Experiments with mixtures: A Review. *Technometrics*, 15, 437-455.
- Cornell Jhon, A. (1981). *Experiments with mixtures*. John Wiley and Sons.
- Estrada-Campuzano, G., Miralles, D. J., y Slafer, G. A. (2008). Genotypic variability and response to water stress of pre- and post-anthesis phases in triticale. *European Journal of Agronomy*, 28, 171-177.
- Estrada-Campuzano, G., Slafer, G. A., y Miralles, D. J. (2012). Differences in yield, biomass and their components between triticale and wheat grown under contrasting water and nitrogen environments. *Field Crops Research*, 128, 167-179.
- Guillon, F., Bouchet, B., Jamme, F., Robert, P., Quéméner, B., Barron, C., Larré, C., Dumas, P., y Saulnier, L. (2011). Brachypodium distachyon grain: characterization of endosperm cell walls. *Journal of Experimental Botany*, 62, 1001-1015.
- Hosseinian, F. S., y Mazza, G. (2009). Triticale bran and straw: potential new sources of phenolic acids, proanthocyanidins, and lignans. *Journal of Functional Foods*, 1, 57-64.
- Jonnala, R. S., Irmak, S., Macritchie, F., y Bean, S. R. (2010). Phenolics in the bran of waxy wheat and triticale lines. *Journal of Cereal Science* 52, 509-515.
- Karamac, M., Amarowicz, R., Weidner, S., Abe, S., y Shahidi, F. (2004). Antioxidant activity of triticale caryopses and embryos extracts. *Food Science and Biotechnology*, 13, 421-424.
- 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.
- 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.
- Montgomery, D. C. (2009). *Design and analysis of experiments* (7ª ed., pp. 472-484). John Wiley & Sons Inc.
- 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.
- Pulido, R., Bravo, L., y Saura-Calixto, F. (2000). Antioxidant activity of dietary polyphenols as determined by a modified ferric reducing/antioxidant power assay. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 3396-3402.
- Saura-Calixto, F. (2011). Dietary fiber as a carrier of dietary antioxidants: An essential physiological function. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 43-49.
- Saura-Calixto, F., Pérez-Jiménez, J., y Goñi, I. (2009). Contribution of cereals to dietary fibre and antioxidant intakes: Toward more reliable methodology. *Journal of Cereal Science*, 50, 291-294.
- Spizzirri, U. G., Iemma, F., Puoci, F., Cirillo, G., Curcio, M., Parisi, O. I., y Picci, N. (2009). Synthesis of antioxidant polymers by grafting of gallic acid and catechin on gelatin. *Biomacromolecules*, 10, 1923-1930.
- Stumpf, B., Yan, F., y Honermeier, B. (2015). Nitrogen fertilization and maturity influence the phenolic concentration of wheat grain (*Triticum aestivum*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178, 118-125.
- Tunland, B.C., y Meyer, D. (2002). Nondigestible Oligo- and Polysaccharides (Dietary Fiber): Their Physiology and Role in Human Health and Food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 3, 90-109.