

Artículos de investigación científica y tecnológica

Efecto de la fertilización nitroazufrada sobre el rendimiento y calidad de tres genotipos de maíz con diferentes texturas de endospermo

Effect of nitrogen-sulfur fertilization on yield and quality of three corn genotypes differing in endosperm texture

Marta Gertrudis Barrios Sánchez,^{1*} Gustavo Adolfo Rodríguez Yzquierdo,²
María Gabriela Álvarez Escobar³

¹ Profesora Asociada, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Maracay, Venezuela.
Correo: martabarríos3@gmail.com; marta.barríos@ucv.ve; Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6766-0754>

² Investigador PhD, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), CI Tibaitatá.
Mosquera, Colombia. Correo: grodriguez@agrosavia.co; Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3709-8534>

³ Estudiante de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Instituto de Agronomía.
Maracay, Venezuela. Correo: mariagabrielaave@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9669-6337>

Editor temático: Luis Fernando Chávez Oliveros (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA])

Fecha de recepción: 29/06/2018

Fecha de aprobación: 10/04/2019

Para citar este artículo: Barrios Sánchez, M. G., Rodríguez Yzquierdo, G. A., & Álvarez Escobar, M. G. (2019). Efecto de la fertilización nitroazufrada sobre el rendimiento y calidad de tres genotipos de maíz con diferentes texturas de endospermo.

Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 20(3), 551-563

DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num3_art:1591



Esta licencia permite distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de la obra de modo no comercial, siempre y cuando se dé el crédito y se licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

* Autor de correspondencia. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía. Avenida Universidad, vía El Limón, Maracay, Venezuela.

Resumen

Para conocer el efecto de la fertilización nitroazufrada sobre rendimiento y calidad de maíz, se realizó un experimento en el Asentamiento Campesino Arenales, estado Aragua, Venezuela (10°06'17" N y 67°35'44" O). El diseño utilizado fue parcelas divididas con cuatro repeticiones; en las parcelas principales se consideraron tres híbridos de diferentes texturas de endospermo: DK-5632 (córneo), DK-440 (semicórneo) y DK-5277 (semi-dentado), y en las secundarias, tres niveles de N (0, 100 y 200 kg/ha) y dos niveles de S (0 y 50 kg/ha). Las variables medidas fueron rendimiento (REND), peso de mil granos (P1000G), granos por metro cuadrado (G/m²), peso hectolítrico (PH), índice de flotación (IF), dureza (D) y proteína cruda (PC).

Los genotipos aumentaron significativamente REND, P1000G y G/m² con el nivel de fertilización N₂₀₀S₅₀. DK-5277 alcanzó valores mayores de REND mientras que DK-5632 y DK-440 obtuvieron valores más altos de PH y menores de IF, con diferencias significativas ($p \leq 0,05$). El nivel de fertilización N₂₀₀S₅₀ disminuyó significativamente el IF en todos los genotipos. La fertilización nitroazufrada aumentó más de 100 % la D del DK-5277. El IF se asoció de manera negativa y altamente significativa con el PH, mientras que P1000G y REND presentaron correlación positiva y altamente significativa. La PC se asoció positiva y significativamente con el REND, y de forma positiva y altamente significativa con P1000G y PH.

Palabras clave: aplicación de abonos, azufre, nitrógeno, rendimiento de cultivos, *Zea mays*

Abstract

To establish the effect of nitrogen-sulfur fertilization on yield and corn quality, an experiment was carried out at the peasant settlement of Arenales, Aragua state, Venezuela (10°06'17" N, 67°35'44" W). The experimental design used was a split-plots with four replicates; three hybrids differing in endosperm texture were arranged on the main plots: DK-5632 (flint), DK-440 (semi-flint) and DK-5277 (semi-dent), and on secondary plots, three levels of nitrogen (0, 100 and 200 kg/ha) and two levels of sulfur (0 and 50 kg/ha). The variables measured were the yield, the weight of 1000 grains (W1000G), grains per square meter (G/m²), hectoliter weight (HW), flotation index (FI), grain hardness (GH) and crude protein (CP). All corn genotypes increased their yield, W1000G and G/m² significantly with the

level of fertilization N₂₀₀S₅₀. Genotype DK-5277 reached the highest yield, while DK-5632 and DK-440 obtained higher values of HW compared to those achieved by DK-5277, as well as a lower FI, with significant differences at $p \leq 0.05$. The level of fertilization N₂₀₀S₅₀ allowed a significant decrease of the FI values in all corn genotypes. Nitrogen-sulfur fertilization increased in more than 100% the GH of DK-5277. The FI showed a negative and significant association with HW, while a positive and highly significant correlation was found between W1000G and yield. For all hybrids, CP was positive and significantly associated with yield and positive and highly significant with W1000G and HW.

Keywords: crop yield, fertilizer application, nitrogen, sulphur, *Zea mays*

Introducción

La fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz es uno de los aspectos más importantes de su manejo agronómico, y ha sido determinante en la obtención de elevados rendimientos a nivel mundial. El nitrógeno es considerado el principal elemento para la producción vegetal por ser, en la mayoría de las situaciones, el factor limitante de la productividad (Capurro, Fiorito, González, & Pagani, 2002; Kappes, Orivaldo, & Da Costa, 2013). Por su parte, el azufre es actualmente un nutriente de importancia, cuya deficiencia se informa frecuentemente en diversos trabajos (Ferraris et al., 2007; Sakal, Singh, Sinha, & Ismail, 2000; Weil, & Mughogho, 2000).

En Venezuela es escasa la información relativa a la respuesta del maíz a la fertilización con azufre. Sin embargo, la probabilidad de que la productividad del cultivo sea afectada por esta deficiencia es elevada, ya que los suelos maiceros venezolanos en su mayoría reúnen condiciones que propician la deficiencia de este elemento. Entre esas condiciones se pueden mencionar la disminución progresiva del contenido de materia orgánica, la escasa rotación y la insuficiente reposición de nutrientes (Caamaño & Melgar, 1998; Reussi, Echeverría, & Sainz, 2006).

Por otra parte, estos dos nutrientes han probado ser fundamentales en el mejoramiento de la calidad física y nutricional del grano de maíz. La disponibilidad de N afecta el rendimiento y la calidad del grano (Governatori & Uhart, 1997; Vázquez, Arellano, & Santiago, 2015). El S, por su parte, es constituyente de aminoácidos como cistina y metionina, por lo que la aplicación de fertilizantes azufrados aumenta el contenido de proteínas del grano e incide sobre la textura del endospermo (Pedrol, Salvagiotti, Castellarín, Rosso, & Vernizzi, 1999; Salvagiotti, Castellarin, Miralles, & Pedrol, 2009). Esto modifica positivamente parámetros determinantes de la calidad como el peso hectolítrico, el índice de flotación y la dureza (Barrios, Basso, & García, 2016). La calidad del grano de maíz es una característica determinada por factores como clima y suelo, así como por factores que podemos manipular con el fin de mejorar y mantener los niveles de rendimiento y de calidad, entre los que se encuentra la fertilización. Este trabajo tiene como objetivo

evaluar el efecto de la fertilización con N y S sobre el rendimiento y algunos de sus componentes, y sobre aspectos de la calidad del grano de tres genotipos de maíz de diferente textura de endospermo.

Materiales y métodos

El ensayo de campo se llevó a cabo en el Asentamiento Campesino Arenales, Parcela #18, Distrito Zamora, estado Aragua, Venezuela (10°06'17" N y 67°35'44" O), con promedios anuales de precipitación y temperatura de 820 mm y 26,5 °C, respectivamente (Estación Climática Santa Cruz Edafológica, estado Aragua, Venezuela). Las características físico-químicas del suelo del ensayo se presentan en la tabla 1. Tres genotipos de maíz con diferentes texturas de endospermo constituyen el material vegetal evaluado: córneo (DK-5632), semicórneo (DK-440) y semidentado (DK-5277). La unidad experimental estuvo conformada por parcelas de 3,6 × 4,0 m², con cuatro hileras de 4 m de largo y 0,9 m de separación; la distancia entre plantas fue de 0,20 m.

La fuente de nitrógeno fue urea (46 % de N) y su aplicación se realizó en dos fracciones: la primera, a la siembra; la segunda o reabono, a los 25 días después de la siembra (dds), cuando el cultivo tenía de 6 a 8 hojas desarrolladas (Ritchie, Hanway, & Benson, 1993). Como fuente de azufre se utilizó sulfato de calcio (20 % de S, 16 % de Ca) y se aplicó al momento de la siembra; ambas fuentes fueron incorporadas a una distancia de 5 cm por debajo y al lado de la semilla para evitar efectos fitotóxicos (Ciampitti, Fontaneto, Micucci, & García, 2006). Se utilizó un diseño en parcelas divididas con cuatro repeticiones. En las parcelas principales se consideraron los genotipos de maíz y en las parcelas secundarias, las combinaciones de los niveles de fertilizante, los cuales consistieron en tres niveles de nitrógeno: 0, 100 y 200 kg/ha, y dos niveles de azufre: 0 y 50 kg/ha, designándolos como: N₀S₀, N₁₀₀S₀, N₂₀₀S₀, N₀S₅₀, N₁₀₀S₅₀ y N₂₀₀S₅₀. Se realizó control químico y manual de malezas, insectos plaga y enfermedades, y se aplicó una lámina de agua de 5 mm diarios de riego suplementario por gravedad (surcos).

Tabla 1. Características físico-químicas del suelo del ensayo

Textura	Arena	Limo	Arcilla	MO	N-NO ₃	S-SO ₄	P	K	pH 1:1 en agua
		%		%			mg/kg		
A	9,95	20,79	69,25	2,25	11,65	4,6	16	71	7,1
FA	17,00	27,00	56,00	2,20	10,50	5,2	12	72	6,8

A: Arcilloso, FA: Franco arcilloso, MO: Materia orgánica

Fuente: Laboratorio General de Suelos, Instituto de Edafología fagro-ucv, Maracay, Venezuela.

Variables de productividad

A continuación, se presentan las variables de productividad analizadas en esta investigación:

- Rendimiento. Manualmente se cosecharon 10 m² en cada unidad experimental; la humedad del grano se determinó en madurez fisiológica, cuyos registros se utilizaron para expresar el rendimiento al 12 % de humedad del grano.
- Peso de 1000 granos (P1000G). En cada genotipo 100 granos obtenidos al azar se pesaron en una microbalanza Sartorius Basic con sensibilidad de 0,001 g, posteriormente el resultado en gramos se multiplicó por 10.
- Número de granos por metro cuadrado (G/m²). El número de G/m² fue estimado mediante el cociente entre el rendimiento (sobre base seca) y el peso individual del grano. Este fue determinado con el promedio de dos muestras de 200 granos cada una, secadas en una estufa de aire forzado, durante 10 días.

Variables de calidad del grano

Por otra parte, se presentan las variables referidas a la calidad del grano, que fueron analizadas en esta investigación:

- Peso hectolítrico (PH). El PH se estimó según el método 55-10 (Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists [AACC], 1998) y se expresó en kg/hL.

- Índice de flotación (IF). El IF se obtuvo a partir de 100 granos sanos colocados en un Erlenmeyer de 250 mL, conteniendo 170 mL de una mezcla de kerosene-tetracloruro de carbono (d=1,305 a 25 °C). Luego de una agitación breve con varilla de vidrio, se contaron los granos que flotaron. El índice de flotación se calculó como el porcentaje de granos que flotaron (Robutti, Borrás, González, Torres, & De Greef, 2002).
- Dureza (D). La D se determinó por quintuplicado en una muestra de 10 granos, mediante una prueba de resistencia a la penetración medida con un analizador de textura (TAXT2) provisto con un punzón cónico (ángulo 30°), a una velocidad de 0,5 mm/s, y una distancia de penetración de 2 mm. La dureza del grano se informó en kg-f.
- Proteína cruda (%) (PC). La PC se determinó a través del método de Kjeldahl (AACC, 1998).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron con el programa estadístico Statistix 8.0; se realizó análisis de varianza de acuerdo con el diseño experimental utilizado, y las medias de las combinaciones de los distintos niveles de fertilización se compararon a través del test de comparaciones múltiples de Tukey. También se realizaron las correlaciones entre las variables medidas utilizando el método de Pearson.

Resultados y discusión

Rendimiento y sus componentes

La interacción híbrido \times fertilización fue estadísticamente significativa ($p \leq 0,001$) para todas las variables medidas; este comportamiento está relacionado con el potencial de rendimiento de cada híbrido y el tipo de endospermo, que determinaron la respuesta de los materiales evaluados. En la tabla 2 se observa el efecto de la fertilización nitroazufrada sobre el rendimiento y sus componentes para cada genotipo de maíz evaluado. El híbrido de endospermo semidentado (blando) DK-5277 obtuvo los rendimientos más altos (10.274 kg/ha) cuando se aplicó el nivel de fertilización N200S50, con un incremento respecto al testigo de 42,2%, en comparación a 39,8% y 38,7% de los genotipos córneo y semicórneo, respectivamente.

Comúnmente se observan mayores rendimientos en maíces de textura blanda o semidentados que en maíces duros o córneos, lo que puede estar determinado por una disminución del contenido de proteína en el grano (Ciampitti & Vyn, 2013; Salvagiotti, Castellarín, Ferragutti, Dignani, & Pedrol, 2010). Por su parte, Ferragutti, Castellarín, y Salvagiotti (2016) obtuvieron también mayor respuesta respecto al rendimiento en un híbrido semidentado que en uno córneo, cuando evaluaron los requerimientos nutricionales de maíces córneos y semidentados. Todos los genotipos evaluados alcanzaron los mayores rendimientos cuando fueron fertilizados con N₂₀₀S₅₀ con diferencias estadísticamente significativas entre niveles de fertilización y con el testigo ($p \leq 0,05$).

Capurro et al. (2002) encontraron que la respuesta en rendimiento del maíz al agregado de S fue significativa con dosis de N superiores a 60 kg/ha y mayor a dosis crecientes de N; además, mostraron que existe una significativa interacción N*S. Por otra parte, los genotipos de maíz de alto potencial de rendimiento tienen requerimientos de nutrientes muy elevados, por lo que la respuesta es mayor a mayores dosis de N (Salvagiotti et al., 2010). De igual modo, la interacción entre nutrientes

puede incrementar la eficiencia del fertilizante aplicado y mejora la utilización de N por el cultivo (Stewart, 2007).

Otros cereales también han experimentado respuestas similares a la aplicación de S; Hoffman, Fassana, Mazzilli, Berger y Ernst (2016) encontraron que el agregado de N en presencia de S incrementó las cantidades absorbidas de N en trigo. La respuesta al S de los materiales genéticos de este ensayo está relacionada con los contenidos bajos a medios de materia orgánica y los reducidos tenores de este nutriente en el suelo (tabla 1), además de la prolongada historia agrícola de la zona sin aportes de fertilizantes azufrados, que es la causa determinante de la deficiencia de S en los suelos (Pagani, Echeverría, & Sainz, 2009).

Con respecto al P1000G, se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$) entre los niveles de fertilización y con el testigo (tabla 2) para todos los genotipos, detectándose respuesta a la fertilización con N y S. Todos los materiales evaluados alcanzaron el mayor P1000G con la aplicación de 200 y 50 kg/ha de N y S, respectivamente, diferenciándose significativamente ($p \leq 0,05$) del resto de los niveles de fertilización aplicados.

El aumento del P1000G al incrementar la dosis de N depende generalmente de la relación entre el peso del grano y el crecimiento de la planta durante el llenado de los granos, razón por la cual en el testigo este aumento se vio limitado por la menor cantidad de asimilados (Amin, 2011). En este caso, el agregado de S mejora tanto el rendimiento en grano como el P1000G a la dosis más alta de N, aun cuando el P1000G no es un componente que se asocie tan directamente con el rendimiento como el número de G/m² (Pérez, 2015); estos resultados son indicativos de que las características de cada genotipo y su capacidad para removilizar asimilados hacia el grano pueden favorecer el rendimiento y sus componentes.

En cuanto al número de G/m², considerado el factor más estrechamente relacionado con las variaciones en el rendimiento (Capurro et al., 2002;

Muchow, 1998), se obtuvieron los mayores valores con el nivel de fertilización $N_{200}S_{50}$ para todos los híbridos, con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0,05$) entre los niveles de fertilización y con el testigo. Estos resultados indican que el aumento del número de G/m^2 , en respuesta al agregado de S, fue determinante en el incremento del rendimiento en

los genotipos de maíz evaluados, y que la fertilización con N y, en menor medida, con S modifican la oferta de asimilados y nutrientes y afecta el peso individual y la calidad de los granos (Pagani et al., 2009). Ferragutti et al. (2016) obtuvieron una respuesta similar cuando evaluaron la fertilización con nitrógeno y azufre en maíces cornoos y semidentados.

Tabla 2. Efecto de la fertilización nitroazufrada sobre el rendimiento, el peso de mil granos y el número de granos por metro cuadrado, de tres híbridos de maíz de diferentes texturas de endospermo

Rendimiento (kg/ha)			
Fertilización	DK-5632	DK-440	DK-5277
N_0S_0	7.028,8 f	6.573,8 e	7.223 d
$N_{100}S_0$	9.218,8 c	7.812,5 d	9.631 c
$N_{200}S_0$	9.607,5 b	8.750,0 b	9.875 b
N_0S_{50}	7.817,5 e	8.567,5 c	9.599 c
$N_{100}S_{50}$	8.700,0 d	8.765,8 b	9.930 b
$N_{200}S_{50}$	9.826,3 a	9.119,5 a	10.274 a
\bar{X}	8.699,82	8.264,85	9.422,00
cv (%)	0,73	0,37	0,29
Peso de 1.000 granos (g)			
N_0S_0	234,0 de	233,00 d	234,75 f
$N_{100}S_0$	236,5 d	242,75 c	242,50 d
$N_{200}S_0$	256,0 b	246,00 b	252,25 b
N_0S_{50}	232,3 e	233,75 d	239,00 e
$N_{100}S_{50}$	251,3 c	245,50 b	245,75 c
$N_{200}S_{50}$	266,0 a	257,45 a	262,35 a
\bar{X}	246,02	243,08	246,10
cv (%)	0,70	0,46	0,43

(Continúa)

(Continuación tabla 2)

Rendimiento (kg/ha)			
Granos por m ² (G/m ²)			
N ₀ S ₀	3.241,3 f	3.112,5 d	3293,8 f
N ₁₀₀ S ₀	3.380,0 d	3.385,0 c	3713,3 d
N ₂₀₀ S ₀	3.725,0 b	3.732,5 b	3774,3 b
N ₀ S ₅₀	3.285,0 e	3.156,3 d	3607,8 e
N ₁₀₀ S ₅₀	3.680,5 c	3.733,5 b	3729,3 c
N ₂₀₀ S ₅₀	3.844,3 a	3.815,0 a	4043,0 a
\bar{X}	3.526,02	3.489,13	3693,58
cv (%)	0,09	0,67	0,05

Nota. Letras distintas dentro de una columna indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) de acuerdo con el test de comparaciones múltiples de Tukey.

Fuente: Elaboración propia

Calidad física y nutricional del grano

En la tabla 3 se observa que los valores de PH presentaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre los niveles de fertilización y con el testigo, para todos los híbridos evaluados, lo que muestra que la interacción genotipo \times fertilización influyó significativamente sobre el PH de los granos. En este estudio, los genotipos córneo y semicórneo (DK-5632 y DK-440) obtuvieron valores mayores de PH que el híbrido semidentado, debido a que los granos de endospermo córneo son más densos y pesados que los de endospermo blando, lo que confirma que a mayor dureza del endospermo el PH es mayor. Resultados similares fueron informados por Barrios et al. (2016).

En general, el PH es un parámetro de calidad que responde a la fertilización nitrogenada y, al tomar en consideración que la absorción de N se favorece cuando el cultivo es fertilizado con S (Salvagiotti et al., 2009), son esperables los aumentos de PH

alcanzados. Por otra parte, aun cuando la calidad del genotipo córneo fue mayor en lo relativo al PH, el rendimiento fue menor en comparación con el híbrido de textura blanda o semidentado (tabla 2). Este comportamiento se observa comúnmente en campo, ya que los maíces dentados y semidentados tienen mayor potencial de rendimiento, producto del mejoramiento genético (Calderone, Torres, Papucci, Cruciani, & González, 2008).

El híbrido semidentado DK-5277 mostró también mayor respuesta sobre el PH, en comparación con los otros dos híbridos con la aplicación de N₂₀₀S₅₀, si consideramos que este genotipo experimentó un aumento del 8,9 % con respecto al PH del testigo, en comparación con los aumentos experimentados por el DK-5632 y DK-440, de 6,4 % y 7,7 %, respectivamente. Estos resultados indican una mayor eficiencia en el uso del N con el agregado de 50 kg/ha de S, y representa una mejora en la calidad del grano de este genotipo debido al incremento en los valores de PH. Ya que el S se encuentra en las proteínas como

componente de aminoácidos, entre otros metionina y cistina, la aplicación de fertilizantes azufrados pudiera tener efectos importantes no solo sobre el aumento del contenido de proteínas, sino también sobre los cambios en la textura y densidad del endospermo, aumentando la resistencia al quebrado del grano (Cruciani, González, Papucci, & Pedrol, 2014).

Por su parte, el IF representa uno de los indicadores de dureza más importantes para el proceso de molienda seca (Ferragutti, Salvagiotti, & Castellarín, 2012). En este ensayo se obtuvieron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) para el IF entre los niveles de fertilización y con el testigo, para cada uno de los genotipos evaluados (tabla 3), siendo los híbridos de textura dura y semidura DK-5632 y DK-440 los de menor IF. En este experimento, la aplicación del nivel de fertilización $N_{200}S_{50}$ permitió una disminución significativa de los valores de IF, que es indicativo de una mejora en la calidad del grano en cuanto a su dureza (Zepeda et al., 2009). Esta tendencia se presentó especialmente en el caso del híbrido semidentado DK-5277. Teniendo en cuenta estudios que han mostrado que ocurre una mayor absorción de N en cultivos fertilizados con S (Salvagiotti et al., 2009), estos resultados corroboran que la estrategia de fertilización nitroazufrada tiene un efecto importante sobre la textura del endospermo, aumentando la densidad del grano a través del aumento de la proporción de zeínas y glutelinas en el endospermo córneo (Barrios et al., 2016; Tsai, Dwerkat, Huber, & Warren, 1992).

En relación con la dureza del endospermo, esta es una propiedad del grano asociada a una mayor densidad y vitrosidad del endospermo córneo, factores que dependen de la unión entre el almidón y las proteínas, especialmente las zeínas, fracción abundante en aminoácidos azufrados (Cirilo, Actis, Andrade, & Valentinuz, 2011). En este estudio se obtuvieron, para todos los genotipos evaluados, diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre los niveles de fertilización y con el testigo para el test de dureza; el genotipo DK-5277 de endospermo blando alcanzó valores más bajos que los genotipos córneo y semicórneo, como era de esperarse, ya que mientras

en la fracción córnea del endospermo el almidón y la proteína se encuentran fuertemente ligados, en la fracción harinosa el enlace es más débil, aunque la fertilización con N y S permitió una respuesta mucho más evidente en este genotipo, debido a que el aumento con respecto al testigo fue de más de 100% en comparación con 15,99% y 20,18% de los híbridos córneo y semicórneo, respectivamente. El mejoramiento de los valores del test de dureza, en respuesta a la fertilización nitroazufrada en todos los híbridos evaluados, corrobora que una oportuna nutrición con S y N, que asegure un flujo adecuado de estos nutrientes a los granos, favorecería su dureza al aumentar la concentración de ambos elementos (Cirilo et al., 2011).

Con respecto al contenido de PC, las medias del nivel de fertilización $N_{200}S_{50}$ para todos los híbridos difirieron significativamente con las del resto de los niveles de fertilización y el testigo ($p \leq 0,05$). Estos resultados confirman que el contenido de proteínas se incrementa por una suplencia adecuada de N y S, y que este aumento influye positivamente sobre la densidad del grano, reduciendo la susceptibilidad al quebrado como consecuencia del mayor contenido de zeínas y de la mayor relación endospermo córneo/endospermo harinoso (Cirilo et al., 2011; Cruciani et al., 2014). Por otra parte, las gamma y beta zeínas también requieren S para su síntesis, debido a la presencia de aminoácidos azufrados en su composición (Wu & Messing, 2010), lo que explicaría la respuesta a esta estrategia de fertilización.

La correlación entre las variables medidas se presenta en la tabla 4. Para los tres genotipos la PC se asoció positiva y significativamente con el REND y la D, y de forma positiva y altamente significativa con el PH y el P1000G, mientras que con el IF presentó una correlación negativa y altamente significativa. Las estrategias de fertilización evaluadas en este ensayo permitieron un aumento de la calidad física del grano a través de una disminución de los IF de cada híbrido. El PH se asoció de manera negativa y altamente significativa con el IF, mientras que el P1000G y el rendimiento se asociaron de forma positiva y altamente significativa.

Tabla 3. Efecto de la fertilización nitroazufrada sobre el peso hectolítrico, el índice de flotación, la dureza y el contenido de proteína cruda de tres híbridos de maíz de diferentes texturas de endospermo

Peso hectolítrico (kg/hL)			
Fertilización	DK-5632	DK-440	DK-5277
N_0S_0	76,59 f	75,88 f	72,40 f
$N_{100}S_0$	79,20 d	79,12 d	76,30 d
$N_{200}S_0$	80,12 c	80,09 c	76,50 c
N_0S_{50}	78,22 e	78,10 e	76,12 e
$N_{100}S_{50}$	81,30 b	81,25 b	77,70 b
$N_{200}S_{50}$	81,49 a	81,69 a	78,81 a
\bar{X}	79,49	79,36	76,31
cv (%)	0,03	0,04	0,04
Índice de flotación (%)			
N_0S_0	6,89 a	6,16 a	13,74 a
$N_{100}S_0$	2,83 c	3,14 d	11,83 b
$N_{200}S_0$	2,64 d	3,40 c	10,45 d
N_0S_{50}	3,81 b	3,66 b	11,21 c
$N_{100}S_{50}$	2,47 e	3,03 e	10,12 e
$N_{200}S_{50}$	2,34 f	2,74 f	9,23 f
\bar{X}	3,50	3,69	11,10
cv (%)	0,57	0,73	0,14

(Continúa)

(Continuación tabla 3)

Peso hectolítico (kg/hL)			
Fertilización	DK-5632	DK-440	DK-5277
Test de dureza (kg-f)			
N_0S_0	85,10 f	79,24 f	15,80 f
$N_{100}S_0$	88,91 d	87,62 d	26,93 d
$N_{200}S_0$	96,51 c	91,97 c	27,98 c
N_0S_{50}	87,27 e	85,73 e	17,13 e
$N_{100}S_{50}$	97,06 b	93,69 b	29,09 b
$N_{200}S_{50}$	98,71 a	95,23 a	32,65 a
\bar{X}	92,26	88,91	24,93
cv (%)	0,05	0,05	1,55
Proteína cruda (%)			
N_0S_0	8,34 e	7,95 f	7,32 f
$N_{100}S_0$	9,33 d	10,19 d	8,25 e
$N_{200}S_0$	10,66 b	10,37 c	9,66 c
N_0S_{50}	9,93 c	9,25 e	8,61 d
$N_{100}S_{50}$	10,00 c	11,15 b	10,25 b
$N_{200}S_{50}$	11,14 a	11,72 a	10,37 a
\bar{X}	9,9	10,11	9,08
cv (%)	0,90	0,38	0,31

Nota. Letras distintas dentro de una columna indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) de acuerdo con el test de comparaciones múltiples de Tukey

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Coeficientes de correlación lineal entre la dureza del endospermo (D), granos por metro cuadrado (G/m²), índice de flotación (IF), peso hectolítrico (PH), peso de 1.000 granos (P1000G), porcentaje de proteína cruda (PC) y rendimiento, en tres híbridos de maíz de diferentes texturas de endospermo

	D	G/m ²	IF	PH	P1000G	PC
G/m ²	-0,1659					
	Ns					
IF	-0,9683	0,0401				
	**	Ns				
PH	0,7183	0,4058	-0,8207			
	**	Ns	**			
P1000G	0,0915	0,8746	-0,1957	0,6055		
	Ns	**	Ns	**		
PC	0,5081	0,4370	-0,6392	0,9038	0,7100	
	*	Ns	**	**	**	
Rendimiento	-0,2678	0,8311	0,0868	0,4021	0,6902	0,5102
	Ns	**	Ns	Ns	**	*

Ns: No significativo. **Significativo al 1 % de probabilidad. *Significativo al 5 % de probabilidad.

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

La interacción entre el genotipo y la estrategia de fertilización influye en todas las variables medidas en este estudio. Todos los híbridos alcanzan los rendimientos más altos cuando son fertilizados con el nivel de fertilización N₂₀₀S₅₀. El híbrido de endospermo blando presenta los rendimientos más altos. La fertilización con N y S para todos los híbridos evaluados genera aumento en el porcentaje de proteínas, que produce efectos sobre la textura del grano, aumenta su densidad y peso, y disminuye

su IF. La aplicación de N₂₀₀S₅₀ permite disminuir significativamente los valores de IF en todos los híbridos. Los resultados obtenidos para las variables medidas indican una mayor eficiencia en el uso del N con el agregado de 50 kg/ha de S. El rendimiento y el P1000G se correlacionan de manera positiva y altamente significativa, mientras que la PC se asocia positiva y significativamente con el REND y la D del grano, y de forma positiva y altamente significativa con el PH y el P1000G. El PH presenta una correlación negativa y altamente significativa con el IF.

Agradecimientos

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela, por el financiamiento del trabajo a través del Proyecto CDCH-PG-01-8157-2013.

Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento, están de acuerdo con su publicación y manifiestan que no existen conflictos de intereses en este estudio.

Referencias

- American Association of Cereal Chemists (AACC). (1998). *Approved Methods*. St. Paul, EE. UU. autor.
- Amin, M. E. (2011). Effect of different nitrogen sources on growth, yield and quality of fodder maize (*Zea mays* L.). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Science*, 10(1), 17-23. doi:10.1016/j.jssas.2010.06.003.
- Barrios, M., Basso, C., & García, J. (2016). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento y la calidad de seis híbridos comerciales de maíz en Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía (UCV)*, 42(1), 15-23.
- Caamaño, A., & Melgar, R. J. (1998). Fertilización con fósforo, nitrógeno y azufre en ambientes de alta productividad. *Revista Tecnología Agropecuaria*, 2(5), 11-14.
- Calderone, M., Torres, J., Papucci, S., Cruciani, M., & González, A. (2008). Influencia del sistema de labranza y la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento y la calidad de maíz (*Zea mays* L.). *Revista Agro Mensajes*, 56, 26-27. Recuperado de http://rephip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/1255/Labranza_fertilizacion_maiz.pdf?sequence=1.
- Capurro, J., Fiorito, C., González, M., & Pagani, R. (2002). Fertilización del cultivo de maíz en Cañada de Gómez. Campaña 2001/02. *Revista Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 15, 81-84.
- Ciampitti, I. A., Fontanetto, H., Micucci, F., & García, F. O. (2006). Manejo y ubicación del fertilizante junto a la semilla: Efectos Fitotóxicos. *Informaciones Agronómicas*, 31(10), 1-8. Recuperado de [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/485FEB666B9B7BC03257967004AA42C/\\$FILE/AA%2010.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/485FEB666B9B7BC03257967004AA42C/$FILE/AA%2010.pdf).
- Ciampitti, I. A., & Vyn, T. J. (2013). Grain nitrogen source changes over time in maize: A review. *Crop Science*, 53(2), 366-377. doi:10.2135/cropsci2012.07.0439.
- Cirilo, A. G., Actis, M., Andrade, F. H., & Valentinuz, O. R. (2011). Crop management affects dry-milling quality of flint maize kernels. *Field Crops Research*, 122(2), 140-150. doi:10.1016/j.fcr.2011.03.007.
- Cruciani, M. A., González, A., Papucci, S., & Pedrol, H. (2014). Fertilización nitro azufrada: rendimiento y calidad en híbridos de maíz. *Ciencia Agronómica*, 22 (13), 21-25.
- Ferragutti, F., Salvagiotti, F., & Castellarín, J. (2012). Rendimiento y calidad de maíz según estrategias de fertilización con nitrógeno y azufre. *Boletín infoINTA Santa Fe Sur*, 13, 41-43. Recuperado de <https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-rendimiento-calidad-maz-segn-estrategias-fertilizacin.pdf>.
- Ferragutti, F., Castellarín, J., & Salvagiotti, F. (2016). Momento de fertilización con nitrógeno y azufre y requerimientos nutricionales en maíces flint y semientados. Artículo técnico Instituto Nacional Tecnología Agropecuaria. *Simposio Fertilidad 2015, Nutriendo los Suelos para las Generaciones del Futuro*, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/momento-fertilizacion-con-nitrogeno-t32397.htm>
- Ferraris, G., Couretot, L., Mouségne, F, López de Sabando, M., Pontoni, R., & Sola, R. (2007). Evaluación de diferentes dosis y momentos de aplicación de nitrógeno y su interacción con el azufre utilizando fuentes líquidas en Maíz, en el norte de Buenos Aires. En Autor, *Experiencias en fertilización y protección en el cultivo de maíz* (pp. 136-146). Buenos Aires, Argentina: Cerban; Áreas de Desarrollo Rural EEA INTA Pergamino y General Villegas.
- Governatori, S., & Uhart, S. (1997). Efecto de la disponibilidad del nitrógeno sobre la calidad física de los granos de cultivares de maíz liberados en diferentes épocas. *Actas del VI Congreso Nacional de Maíz*, 2, 46-53.
- Hoffman, E., Fassana, N., Mazzili, S., Berger, A., & Emst, O. (2016). La productividad parcial de los nutrientes. La necesidad de incrementar la eficiencia de uso del Nitrógeno. Recuperado de <https://www.engormix.com/agricultura/foros/productividad-parcial-nutrientes-necesidad-t40508/>.
- Kappes, C., Orivaldo, A., & Da Costa, J. (2013). Produtividade do milho em condições de diferentes manejos do solo e de doses de nitrogênio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(5), 1310-1321.
- Muchow, R. C. (1998). Nitrogen utilization efficiency in maize and grain sorghum. *Field Crops Research*, 56(1-2), 209-216. doi:10.1016/S0378-4290(97)00132-9
- Pagani, A., Echeverría, H., & Sainz, H. (2009). Respuesta a nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en diferentes ambientes de la Provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo*, 27(1), 21-29.

- Pedrol, H., Salvagiotti, F., Castellarín, J., Rosso, O., & Vernizzi, A. (1999). Maíz: respuesta a la fertilización azufrada con diferentes niveles de nitrógeno y fósforo. *Para Mejorar la Producción*, 10, 51-56.
- Pérez, G. (2015). *Evaluación de cultivares de maíz campaña 2014-2015 en Bolívar*. Bolívar, Argentina: Instituto Nacional Tecnología Agropecuaria (INTA). Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_bolvar_evaluacion_de_cultivares_de_maz_campaa_201.pdf
- Reussi, N., Echeverría, H., & Sainz, H. (2006). Respuesta del cultivo de trigo al agregado de azufre en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 24(1), 77-87.
- Ritchie, S. W., Hanway, J., & Benson, G. (1993). *How a corn plant develops*. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames, Iowa. Special Report N.º 48. Recuperado de https://s10.lite.msu.edu/res/msu/botonl/b_online/library/maize/www.ag.iastate.edu/departments/agronomy/corngrows.html
- Robutti, J. L., Borrás, F. S., González, R. J., Torres, R. L., & De Greef, D. M. (2002). Endosperm properties and Extrusion cooking behavior of maize cultivars. *Food Science and Technology*, 35(8), 663-669. doi:10.1006/fstl.2002.0926.
- Sakal, R., Singh, A. P., Sinha, R. B., & Ismail, M. (2000). Relative performance of some sulphur sources on sulphur nutrition of crops in calcareous soil. *Annals of Agricultural Research*, 21, 206-211.
- Salvagiotti, F., Castellarín, J., Miralles, D., & Pedrol, H. (2009). Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crop Research*, 113, 170-177.
- Salvagiotti, F., Castellarín, J., Ferragutti, F., Dignani, D., & Pedrol, H. (2010). Umbrales de respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz y dosis óptimas económicas según potencial de producción. *Para Mejorar la Producción*, 44, 41-44.
- Stewart, W. M. (2007). Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. *Informaciones Agronómicas*, 67, 1-7.
- Tsai, C., Dweikat, I., Huber, D., & Warren, H. (1992). Interrelationship of nitrogen nutrition with maize (*Zea mays*) kernel yield, nitrogen use efficiency and kernel quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 58, 1-8. doi:10.1002/jsfa.2740580102
- Vázquez, G., Arellano, J., & Santiago, D. (2015). Rendimiento y calidad de grano y de tortilla de maíces híbridos de Valles Altos de México crecidos en riego y temporal. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38 (1), 75-83. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v38n1/v38n1a10.pdf>
- Weil, R. R., & Mughogho, S. K. (2000). Sulfur nutrition of maize in four regions of Malawi. *Agronomy Journal*, 92(4), 649-656. doi:10.2134/agronj2000.924649x
- Wu, Y., & Messing, J. (2010). RNA Interference-mediated change in protein body morphology and seed opacity through loss of different zein proteins. *Plant Physiology*, 153(1), 337-347. doi:10.1104/pp.110.154690.
- Zepeda, R., Carballo, A., Muñoz, A., Mejía, A., Figueroa, B., Hernández, C. (2009). Proteína, triptófano y componentes estructurales del grano en híbridos de maíz (*Zea mays* L.) producidos bajo fertirrigación. *Agrociencia*, 43(2), 143-152.

