



PRODUCCIÓN Y RENTABILIDAD DE MAÍCES NATIVOS AZULES BAJO DIFERENTES DENSIDADES DE POBLACIÓN Y RÉGIMENES HÍDRICOS†

[PRODUCTION AND PROFITABILITY OF LANDRACE BLUE MAIZE UNDER DIFFERENT PLANT DENSITIES AND WATER REGIMENS]

Reyna Armendáriz-Beltrán, Eleazar Lugo-Cruz*, Rafael Ruíz-Hernández, Francisco Zavala-García and Nelly Cristina Ramírez-Grimaldo

Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Agronomía. Carretera a Sandia km 2, La Ascensión, Aramberri, Nuevo León, México. C.P. 67950. Email:

reyna.armendarizbrn@uanl.edu.mx, eleazar.lugocr@uanl.edu.mx,

rafael.ruizhr@uanl.edu.mx, francisco.zavalagr@uanl.edu.mx,

nramirezg@uanl.edu.mx

* Corresponding author

SUMMARY

Background: It is necessary to increase maize production due to the increase in global food demand. Producers in Mexico prefer to grow native varieties of maize, which have a wide genetic diversity that has not been fully studied. These native maize are being lost due in part to their low yields, as well as their low or no profitability. Despite this, in this germplasm it is possible the presence of genotypes that show high grain production and economic gains. Increasing plant density can be a viable strategy that contributes to improving the production systems of these native maize. **Objective:** To analyze the agronomic behavior and profitability of blue native maize genotypes in two population densities and two water regimes. **Methodology:** The study was carried out in the spring summer 2022 cycle in Nuevo León, Mexico (24°19'11.4"N, 99°56'34.8"W, 1980 m.a.s.l.). The treatments were the combination of four genotypes (Mimbres, Ascensión, Siberia and a Hybrid as a control), two water regimes (irrigated and rainfed) and two population densities (62,500 and 83,333 plants ha⁻¹), which were distributed in a random complete block design with split-split plot design. Analysis of variance, Pearson correlation and principal components were carried out to understand the behavior and relationship between variables. **Results:** Grain yield was 38% higher in irrigation compared to rainfed. Increasing the density to 83,333 plants ha⁻¹ also contributed to increasing grain yield and economic profitability, only in native maize. The number of grains per m² and grain weight per ear were the components that were mostly associated with the benefit-cost ratio and grain yield. **Implications:** The native maize studied are important genetic resources with a favorable response to high plant density, therefore, increasing the density to 83,333 plants ha⁻¹ is a strategy that could be explored to increase grain production and profitability of native maize, in addition, this proposal could be more easily adopted by producers, since it would not significantly affect their production cost. **Conclusions:** It was feasible to cultivate native maize at a density of 83,333 plants ha⁻¹ both under irrigation and rainfed conditions, since only with this density and such maize genotypes was it possible to obtain the highest grain yield and economic gains.

Key words: pigmented native maize; grain yield and its components; cost-benefit ratio.

RESUMEN

Antecedentes: Es necesario aumentar la producción de maíz debido al incremento en la demanda mundial de alimentos. Los productores en México prefieren cultivar variedades nativas de maíz, las cuales albergan una amplia diversidad genética que no ha sido estudiada por completo. Estos maíces se están perdiendo debido en parte a sus bajos rendimientos, así como a su baja o nula rentabilidad. A pesar de ello, en este germoplasma pueden existir genotipos que presenten alta producción de grano y permitan obtener ganancias económicas, además, aumentar la densidad de plantas puede ser una estrategia viable que contribuya a mejorar los sistemas de producción de estos maíces. **Objetivo:** Analizar el comportamiento agronómico y la rentabilidad de genotipos de maíz nativo azul en dos densidades de población y dos regímenes hídricos. **Metodología:** El estudio se llevó a cabo en el ciclo primavera verano 2022 en Nuevo León, México (24°19'11.4"N, 99°56'34.8"W, 1980 m.s.n.m.). Los tratamientos fueron la combinación de cuatro

† Submitted May 18, 2024 – Accepted August 23, 2024. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5645>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = Reyna Armendáriz-Beltrán: <https://orcid.org/0009-0003-0700-627X>; Eleazar Lugo-Cruz: <https://orcid.org/0000-0002-2063-8277>;

Rafael Ruíz-Hernández: <https://orcid.org/0000-0001-9030-0039>; Francisco Zavala-García: <https://orcid.org/0000-0001-5421-1231>; Nelly

Cristina Ramírez-Grimaldo: <https://orcid.org/0000-0002-1643-233X>

genotipos (Mimbres, Ascensión, Siberia y un Híbrido testigo), dos regímenes hídricos (riego y temporal) y dos densidades de población (62,500 y 83,333 plantas ha⁻¹), los cuales se distribuyeron en un diseño en bloques completos al azar con arreglo en parcelas sub divididas. Se elaboraron análisis de varianza, de correlación de Pearson y de componentes principales para conocer el comportamiento y la relación entre variables. **Resultados:** El rendimiento de grano fue 38 % mayor en riego comparado con temporal. Asimismo, el rendimiento de grano y la rentabilidad económica fueron mayores en densidad de 83,333 plantas ha⁻¹ comparado con densidad baja, pero sólo en los maíces nativos. El número de granos por m² y el peso del grano total de la mazorca fueron los componentes que mayormente se asociaron a la relación beneficio costo y al rendimiento de grano. **Implicaciones:** Los maíces nativos estudiados son importantes recursos genéticos con respuesta favorable a la alta densidad de población, por ello, incrementar la densidad a 83,333 plantas ha⁻¹ es una estrategia que se podría explorar para incrementar la producción de grano y la rentabilidad del maíz nativo bajo las condiciones de estudio, además, esta propuesta la podrían adoptar más fácilmente los productores, ya que no afectaría significativamente su costo de producción. **Conclusiones:** Fue viable cultivar los maíces nativos con una densidad de 83,333 plantas ha⁻¹ tanto en riego como en temporal, ya que sólo con esta densidad y tales maíces se logró obtener el mayor el rendimiento de grano y ganancias económicas.

Palabras clave: maíz nativo pigmentado; rendimiento de grano y sus componentes; relación beneficio costo.

INTRODUCCIÓN

El maíz es un cultivo de interés mundial, ya que es el cereal más producido y usado para la alimentación humana y animal, así como materia prima industrial (Shah *et al.*, 2021). El incremento en la demanda mundial de alimentos exige producir más maíz por área agrícola, lo cual es un reto complejo principalmente para pequeños productores, quienes cultivan mayormente en sistemas de temporal, con baja tecnología y representan la mayoría de los productores en México y el mundo (Hellin *et al.*, 2014; Lowder *et al.*, 2021).

El manejo de la densidad de plantas juega un papel clave para maximizar la producción de maíz por unidad de área (Zhang *et al.*, 2021), por ello, actualmente existe interés por entender el efecto de esta práctica, ya que se ha encontrado que usar una densidad óptima es una estrategia prometedora, ya que incrementa la interceptación de radiación, el número de granos por área, la biomasa y la eficiencia en el uso de agua y nitrógeno (Yan *et al.*, 2017; Alemán-Pérez *et al.*, 2024). Por el contrario, usar una densidad por debajo del óptimo provoca menor rendimiento de grano, debido a una mayor infestación de malezas, menor número de plantas productivas y menor eficiencia en el uso de recursos. Por su parte, una densidad por encima del óptimo provoca también un menor rendimiento del maíz, esto debido a un aumento de la asincronía floral, acame de tallo, aborto de granos, senescencia foliar acelerada y competencia por recursos, además; porque disminuye la fotosíntesis, clorofila foliar, índice de cosecha y la longitud, peso y número de granos de mazorcas (Djaman *et al.*, 2022; Al-Naggar *et al.*, 2023).

Cabe destacar que no existe una densidad de plantas adecuada para todos los sistemas de producción de maíz, ya que la densidad óptima está influenciada por factores genéticos, edafoclimáticos y de manejo del cultivo. Por ejemplo, se ha encontrado una respuesta diferencial a la densidad debida al genotipo (Al-

Naggar *et al.*, 2023), latitud (Assefa *et al.*, 2016), temperatura del aire (Thompson *et al.*, 2013), distancia entre surcos (Testa *et al.*, 2016), fecha de siembra (Djaman *et al.*, 2022), dosis de nitrógeno (Al-Naggar *et al.*, 2023) y régimen hídrico (Ramírez-Díaz *et al.*, 2021). De hecho, en maíz se ha sugerido usar menor densidad de población en temporal que en riego, ya que las sequías severas junto con el estrés por alta densidad causan mayor esterilidad y pérdida del rendimiento (Hernández *et al.*, 2020). Lo anterior destaca la importancia de gestionar la densidad de plantas de maíz en las condiciones locales de producción.

En Nuevo León, México, se recomienda usar una densidad para maíz de 37,000 a 50,000 plantas ha⁻¹ en temporal, así como de 62,000 a 75,000 plantas ha⁻¹ en riego (INIFAP, 2017), sin embargo, algunos productores establecen un menor número de plantas por hectárea. Estas densidades son menores comparadas con las recomendadas para otros lugares, las cuales oscilan entre 69,000 y 105,000 plantas ha⁻¹ en riego (Testa *et al.*, 2016; Ramírez-Díaz *et al.*, 2021), y entre 65,000 y 67,500 plantas ha⁻¹ en temporal (Ramírez-Díaz *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021).

La mayoría de trabajos sobre densidad en maíz se han centrado en estudiar genotipos mejorados de grano blanco (Ramírez-Díaz *et al.*, 2021; Al-Naggar *et al.*, 2023), y, en parte por ello, existe poca información del efecto de la densidad sobre la producción de maíz nativo, esto a pesar de que en México existe la mayor diversidad de tales maíces, además de que son las semillas preferidas por su adaptabilidad y por razones culinarias y culturales (Hellin *et al.*, 2014).

Los maíces nativos son importantes por su amplia diversidad genética, la cual no ha sido explorada por completo y es valiosa para programas de mejoramiento genético para rendimiento y tolerancia al estrés abiótico, como el que está provocando el cambio climático (Hellin *et al.*, 2014). Estos maíces son importantes en el sur de Nuevo León, ya que, del total de la superficie agrícola en esta zona, el 87 % se

siembra con maíz, y de esta, el 84 % se cultiva en condiciones de temporal, en donde se usan principalmente variedades nativas (SIAP, 2024).

A pesar de lo anterior, los maíces nativos se están perdiendo por el abandono de la agricultura, la sustitución del cultivo, por el uso de semillas mejoradas, por desastres climáticos y por la baja o nula rentabilidad de los sistemas de producción (McLean-Rodríguez *et al.*, 2019). Por ello, en los estudios de estos maíces también es conveniente analizar tal rentabilidad, que es considerada como la capacidad del sistema agrícola para generar beneficios económicos, así como un elemento clave para lograr una agricultura sostenible (FAO, 2015). Además, actualmente existe una creciente demanda de maíces nativos pigmentados a nivel nacional e internacional, lo que motiva su producción, estudio y mejoramiento.

En el acervo genético de maíz pueden existir maíces nativos pigmentados que presenten alta producción de grano y permitan obtener ganancias económicas, además, debido a que en la zona de estudio se usan densidades bajas comparadas con las recomendadas para otros lugares, aumentar la densidad de plantas puede ser una estrategia viable para mejorar los sistemas de producción del maíz. El objetivo del presente estudio fue analizar el comportamiento agronómico y la rentabilidad de genotipos de maíz nativo azul en dos densidades de población y dos regímenes hídricos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental y material genético

El experimento se llevó a cabo en la Facultad de Agronomía, ubicada en la localidad Ascensión, municipio de Aramberri, Nuevo León, México (24°19'11.4"N, 99°56'34.8"W, 1980 msnm). Este lugar presenta un suelo de tipo calcisol y un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (INEGI, 2024). Se

utilizaron cuatro genotipos de maíz de grano azul; tres variedades nativas que usan los productores en la región de estudio (Ascensión, Mimbres y Siberia) que fueron recolectadas en el año 2022. El maíz Mimbres fue colectado en la localidad Mimbres, municipio de Galeana, mientras que, Siberia es nativo de la localidad Siberia del municipio de General Zaragoza, y Ascensión que es nativo de la comunidad en donde se llevó a cabo el experimento. Además, se usó el híbrido Obsidiana recomendado para los valles altos de México con altitudes de entre 1900 y 2400 msnm, de ciclo intermedio (160-165 días a madurez) y con una densidad de siembra recomendada de entre 80,000 y 85,000 semillas ha⁻¹.

Diseño experimental y manejo agronómico

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas subdivididas y cuatro repeticiones. La parcela principal representó a dos regímenes hídricos: 1) Riego, en donde se mantuvo por encima del 50 % de humedad aprovechable del suelo durante todo el ciclo; 2) Temporal, en donde se aplicó sólo un riego para la siembra y después se dejó en condiciones de temporal (Figura 1). La subparcela representó a dos densidades de población (62,500 y 83,333 plantas ha⁻¹, con espacio entre plantas de 15 y 20 cm, respectivamente) y las sub-subparcelas incluyeron los genotipos. La unidad experimental consistió en dos surcos de 0.8 m de ancho y 4 m de largo. La siembra fue manual y se realizó el 25 de junio del 2022 usando dos semillas por punto, para después ajustar a las densidades estudiadas. Se fertilizó con la fórmula 220-60-80, aplicándose todo el fósforo, el potasio y el 50 % del nitrógeno en la siembra, y, al momento de la segunda escarda se añadió el resto del nitrógeno. Se aplicó BasfoliarPs (Compo Expert) de manera foliar (dosis de 1 kg ha⁻¹) en etapa V4. Para el control de gusano cogollero se realizaron dos aplicaciones con cipermetrina (dosis 250 mL ha⁻¹), mientras que las malezas se controlaron de forma manual.

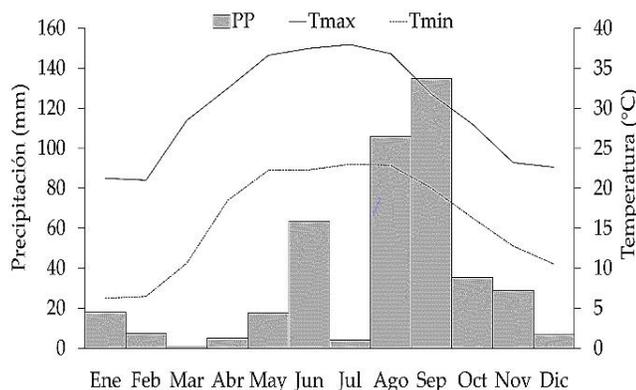


Figura 1. Precipitación (PP), temperatura mínima (Tmin) y temperatura máxima (Tmax) durante el experimento (INIFAP, 2022).

VARIABLES AGRONÓMICAS

Se calculó el rendimiento de grano (RG, t ha⁻¹) ajustado a 14 % de humedad con la siguiente fórmula:

$$RG = PG \times \left(\frac{100-H}{86} \right) \left(\frac{10}{PU} \right)$$

dónde: PG es el peso del grano de la parcela útil (4.8 m²) expresado en kg; H es el porcentaje de humedad del grano y PU es el área cosechada, que corresponde al área de la parcela útil (4.8 m²).

Para medir los componentes del rendimiento se usaron 10 mazorcas representativas de cada unidad experimental, en las cuales se registró el promedio de longitud (LM, cm), número de hileras (NH), granos por hilera (GH), número de granos (GM = NH × GH), peso del grano total (PGM, g) y el peso de 100 granos (P100G, g) de la mazorca. Además, se registró el número de mazorcas cosechadas por m² (NM) y el número de granos por m² (NGM = GM × NM).

ANÁLISIS DE RENTABILIDAD ECONÓMICA

Se estudió la rentabilidad por hectárea con base en el rendimiento de grano (RG), sin incluir otros productos de la planta. El ingreso total (IT, pesos MXN) fue igual al RG (t ha⁻¹) multiplicado por 6965 pesos MXN, que corresponde al precio de garantía del maíz en México para el año 2022 e incluye apoyo para traslado del grano (DOF, 2022). El costo de producción (CP, pesos MXN) consideró los costos de la mano de obra, análisis de fertilidad del suelo, preparación del terreno de manera convencional con tractor, siembra con tractor, fertilización, riego por aspersión con tubería

móvil, control manual de malezas, control químico de plagas y enfermedades y la cosecha manual. La utilidad (UT, pesos MXN) fue igual al ingreso total (IT) menos el costo de producción (CP), mientras que, la relación beneficio costo (RBC) fue igual al IT entre el CP. El punto de equilibrio en rendimiento de grano fue el cociente del costo de producción entre 6965.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se hicieron análisis de varianza usando el software InfoStat versión 2020 (Di Rienzo *et al.*, 2020). La comparación de medias de factores principales e interacciones se llevó a cabo con la prueba Tukey ($p < 0.05$). Con este mismo software se llevó a cabo un análisis de correlación de Pearson y un análisis de componentes principales para analizar la relación entre las variables medidas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los análisis de varianza mostraron que el régimen hídrico sólo tuvo efecto significativo para el rendimiento de grano (Tabla 1). Además, se encontró que tanto el rendimiento de grano como la relación beneficio costo fueron mayormente influenciados por la densidad de población y la interacción densidad por genotipo. Asimismo, se encontraron diferencias significativas en todos los componentes del rendimiento analizados, las cuales se debieron principalmente al genotipo seguido de la densidad de población. El genotipo fue el factor que tuvo efecto significativo en la mayoría de variables estudiadas, lo que indicó que existe variabilidad genética entre los maíces estudiados.

Tabla 1. Significancia estadística del efecto del régimen hídrico y densidad de población sobre variables agronómicas y de rentabilidad de cuatro genotipos de maíz azul.

Fuente de variación	gl	RG	LM	NH	GH	GM	PGM	P100G	NM	NGM	RBC
Bloque (B)	3	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Régimen hídrico (RH)	1	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Error a	3	ns	ns	*	ns	*	*	ns	ns	ns	ns
Densidad (D)	1	*	ns	ns	ns	ns	*	*	*	*	*
RH x D	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns
Error b	6	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Genotipo (G)	3	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	*
RH x G	3	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
D x G	3	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
RH x D x G	3	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Error c	36										
Coeficiente de variación (%)		23.3	9.8	8.4	10.9	14.4	20.1	12.3	23.3	27.1	22.8

gl: grados de libertad. RG: rendimiento de grano (t ha⁻¹); LM: longitud de mazorca (cm); NH: número de hileras por mazorca; GH: número de granos por hilera; GM: número de granos por mazorca; PGM: peso del grano total de la mazorca (g); P100G: peso de 100 granos (g); NM: número de mazorcas cosechadas por m²; NGM: número de granos por m²; RBC: relación beneficio costo. *: significancia estadística con $p < 0.05$; ns: no significativo.

Rendimiento de grano

El rendimiento de grano promedio de los genotipos fue 38 % mayor en condiciones de riego comparado con temporal (Tabla 2). Esto fue debido a que en temporal se presentaron escasas precipitaciones durante la etapa vegetativa y de llenado de granos (Figura 1), esto ocasionó un estrés hídrico que fue identificado por el enrollamiento de las hojas (datos no mostrados), lo cual es un mecanismo de tolerancia a la sequía en maíz (Saglam *et al.*, 2014). En otros estudios se ha encontrado que la disminución del rendimiento de maíz por efecto del déficit hídrico se debe a que, cuando este estrés se presenta antes de la floración disminuye la biomasa, área foliar y el número de granos en la mazorca, mientras que, cuando ocurre durante el llenado de granos, disminuye el peso del grano (Aslam *et al.*, 2015). Sin embargo, en este trabajo no se detectaron diferencias estadísticas entre regímenes hídricos para los componentes del rendimiento, solo se observó que el número de hileras, número de granos y peso del grano de la mazorca tendieron a ser menores en temporal comparado con riego.

Por su parte, sólo los maíces nativos mostraron una respuesta positiva a la densidad alta, ya que su rendimiento fue en promedio 96% mayor con 83,333 plantas ha⁻¹ comparado con la densidad baja (Tabla 2). Esto se podría explicar porque los maíces tienen una respuesta diferencial a la densidad de población

(Ramírez-Díaz *et al.*, 2021). Según Shah *et al.* (2021) algunos maíces presentan características morfo-fisiológicas y genéticas, que permiten tener menor acame, menor aborto de granos y mayor rendimiento de grano bajo alta densidad. En el presente estudio, el mayor rendimiento de grano provocado por aumentar la densidad de plantas se debió a que, al incrementar la densidad también aumentó el peso de 100 granos, peso del grano total de la mazorca, número de mazorcas cosechadas por m² y número de granos por m² (Tabla 3).

Los resultados aquí encontrados difieren de los reportados por Ramírez-Díaz *et al.* (2021), quienes encontraron que, en temporal, el rendimiento de grano de híbridos de maíz disminuyó cuando se aumentó la densidad a 75,000 y 90,000 plantas ha⁻¹. Esto se explica porque los maíces tienen diferente tolerancia a la alta densidad de población (Al-Naggar *et al.*, 2023), además, se ha sugerido que la respuesta del maíz a la densidad de plantas depende de la severidad y momento en que ocurre el estrés hídrico, ya que, una sequía alrededor de la floración y alta densidad de plantas, causan un mayor estrés y pérdida del rendimiento de grano (Hernández *et al.*, 2020). En el presente estudio las mayores precipitaciones coincidieron con el periodo en donde ocurrió la floración masculina, la cual se presentó en el mes de septiembre (datos no mostrados), lo que posiblemente permitió una respuesta positiva al aumento de la densidad de plantas.

Tabla 2. Rendimiento de grano y rentabilidad económica de cuatro genotipos de maíz azul en función del régimen hídrico, densidad, genotipo y la interacción densidad por genotipo.

Tratamiento	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	Ingreso total (pesos MXN)	Costo de producción (pesos MXN)	Utilidad (pesos MXN)	Punto de equilibrio	Relación beneficio costo
Riego	3.3a	23,289	20,506	2,783	2.94	1.14a
Temporal	2.4b	17,026	16,206	820	2.33	1.06a
83,333	3.7a	25,631	18,452	7,179	2.65	1.39a
62,500	2.1b	14,684	18,260	-3,576	2.62	0.80b
Ascensión	3.0a	20,984	17,618	3,366	2.53	1.19a
Mimbres	3.1a	21,859	17,618	4,241	2.53	1.24a
Siberia	2.8a	19,215	17,618	1,597	2.53	1.09ab
Híbrido	2.7a	18,572	20,570	-1,998	2.95	0.90b
83,333-Ascensión	3.8ab	26,314	17,653	8,661	2.53	1.49a
62,500-Ascensión	2.2cd	15,654	17,583	-1,929	2.52	0.89b
83,333-Mimbres	4.2a	29,490	17,653	11,837	2.53	1.67a
62,500-Mimbres	2.0cd	14,229	17,583	-3,354	2.52	0.81b
83,333-Siberia	3.7ab	25,645	17,653	7,992	2.53	1.45a
62,500-Siberia	1.8d	12,786	17,583	-4,797	2.52	0.73b
83,333-Híbrido	3.0bc	21,076	20,847	229	2.99	1.01b
62,500-Híbrido	2.3cd	16,068	20,292	-4,224	2.91	0.79b

Letras diferentes en cada columna indican diferencia dentro de cada tratamiento ($p < 0.05$).

Tabla 3. Componentes del rendimiento de grano en función de la densidad de población y genotipo.

Tratamiento	LM	NH	GH	GM	PGM	P100G	NM	NGM
83,333 plantas	9.3a	13.6a	20.3a	276.7a	64.3a	24.6a	5.89a	1577.9a
62,500 plantas	9.0a	13.2a	19.6a	261.8a	54.7b	22.5b	4.47b	1159.7b
Mimbres	9.3ab	13.8ab	20.0ab	277.8a	66.9a	24.9a	4.76b	1320.1ab
Ascensión	9.8a	12.7bc	21.5a	273.9a	54.9b	21.9b	5.99a	1647.6a
Siberia	8.8b	14.8a	20.1ab	299.7a	66.8a	23.9ab	3.79b	1136.8b
Híbrido	8.8b	12.4c	18.1b	225.7b	49.5b	23.5ab	6.17a	1370.6ab

LM: longitud de mazorca (cm); NH: número de hileras por mazorca; GH: número de granos por hilera; GM: número de granos por mazorca; PGM: peso del grano total de la mazorca (g); P100G: peso de 100 granos (g); NM: número de mazorcas cosechadas por m²; NGM: número de granos por m². Letras diferentes en cada columna indican diferencia significativa entre niveles de cada tratamiento ($p < 0.05$).

Rentabilidad económica

De forma similar al comportamiento del rendimiento de grano, al aumentar la densidad de plantas de 62,500 a 83,333 plantas ha⁻¹ también aumentó la relación beneficio costo (RBC), pero sólo en los maíces nativos, los cuales incrementaron su RBC en 98, 106 y 67 % para Siberia, Mimbres y Ascensión, respectivamente (Tabla 2). La RBC de los maíces estudiados es similar a la reportada en otros maíces nativos cultivados en temporal, que osciló entre 0.88 y 1.24 (Ayala-Garay and Vázquez-Hernández, 2024), sin embargo, es inferior a la RBC de otros híbridos de maíz (entre 2.99 y 5.33) que se sembraron en riego (Aguilar-Carpio *et al.*, 2015; Ayvar-Serna *et al.*, 2020). La mayor RBC de tales híbridos se explica por su mayor rendimiento (entre 4.5 y 14.1 t ha⁻¹), que finalmente incrementó el ingreso total y la rentabilidad.

Por su parte, el punto de equilibrio en rendimiento de grano no varió considerablemente entre las densidades de población, pero en temporal fue menor que en riego y en los maíces nativos fue mejor que en el híbrido (Tabla 2). El punto de equilibrio fue de 2.84, 2.83, 2.22 y 2.21 t ha⁻¹ para los maíces nativos, así como de 3.30, 3.22, 2.68 y 2.60 t ha⁻¹ para el híbrido, esto para el ambiente de riego con densidad alta, riego con densidad baja, temporal con densidad alta y temporal con densidad baja, respectivamente. La variación en el punto de equilibrio se debió principalmente a diferencias en los costos de producción, las cuales se generaron por el distinto costo de la semilla, pues la semilla mejorada tuvo un costo mayor (125 pesos MXN) que la semilla nativa (10 pesos MXN), además, en el sistema de riego se agregó el costo de la aplicación de riegos (4,300 pesos MXN).

El análisis de rentabilidad mostró que, aumentar la densidad a 83,333 plantas ha⁻¹ y usar variedades nativas fue clave para obtener rentabilidad positiva tanto en condiciones de riego como en temporal, con

ello se obtuvo una utilidad promedio de 7992 a 11837 pesos MXN por hectárea, así como una RBC de 1.45 a 1.67 (Tabla 2). Por el contrario, los cuatro maíces estudiados cultivados a 62,500 plantas ha⁻¹ mostraron pérdidas de entre 1929 y 4797 pesos MXN.

Relación entre variables agronómicas y de rentabilidad

La producción de grano fue un factor importante para determinar la rentabilidad económica, ya que el rendimiento correlacionó positivamente con la relación beneficio costo y la utilidad (Tabla 4). Lo anterior se explica porque el ingreso total usado para calcular estas dos variables de rentabilidad, dependió directamente del rendimiento de grano que fue multiplicado por el precio de venta. Además, la relación beneficio costo correlacionó mayormente con el rendimiento de grano ($R^2 = 0.94$) y el ingreso total ($R^2 = 0.94$) que con el costo de producción ($R^2 = -0.03$), lo que sugiere que, para mejorar la rentabilidad de la producción del maíz bajo las condiciones estudiadas, podría ser más beneficioso aumentar el rendimiento de grano y el precio de venta (ingreso total), que disminuir los costos de producción.

Es de destacar que el número de granos por m² y el peso del grano total de la mazorca fueron los componentes que mayormente se asociaron a la relación beneficio costo y al rendimiento de grano (Tabla 4). Se ha reportado que el número de granos es el componente más determinante para el rendimiento del maíz (Djaman *et al.*, 2022), por ello, las prácticas que aumenten esta característica mejorarán el rendimiento y la rentabilidad. En el presente estudio se encontró que, aumentar la densidad a 83,333 plantas ha⁻¹ provocó un incremento en el número de granos por área, lo cual se debió principalmente al mayor número de mazorcas cosechadas, ya que éste aumento en la densidad no afectó el número de granos por planta (Tabla 3).

Tabla 4. Correlación de Pearson de variables agronómicas y de rentabilidad de maíces azules cultivados en dos regímenes hídricos y dos densidades de población.

Variable	Rendimiento de grano	Relación beneficio costo
Rendimiento de grano	---	0.94**
Longitud de mazorca	0.17	0.25
Número de hileras	0.25*	0.22
Número de granos por hilera	0.30*	0.32*
Número de granos por mazorca	0.36**	0.34**
Peso del grano total de la mazorca	0.45**	0.48**
Peso de 100 granos	0.30*	0.37**
Número de mazorcas cosechadas por m ²	0.29*	0.34**
Número de granos por m ²	0.48**	0.53**
Ingreso total	1.00**	0.94**
Costo de producción	0.29*	-0.03
Utilidad	0.95**	0.99**
Punto de equilibrio	0.29*	-0.03
Relación beneficio costo	0.94**	---

* y **: significancia estadística con $p < 0.05$ y $p < 0.01$, respectivamente.

Por su parte, en el análisis de componentes principales los componentes 1 y 2 explicaron el 90.6 % y el 93.4 % de la variación original (Figura 2A y 2B), por lo que fue confiable interpretar las correlaciones en el biplot. En ese análisis se confirmó la superioridad de los maíces nativos sobre el híbrido, debido a que el rendimiento de grano y sus componentes, así como las variables de rentabilidad solamente se asociaron de manera positiva a los maíces nativos, además, estos maíces se relacionaron con un menor costo de producción y punto de equilibrio en comparación con

el híbrido. El genotipo Mimbres fue el que mayormente se relacionó con la producción de grano y variables de rentabilidad, seguido de Ascensión y Siberia (Figura 2A). Similarmente, se clasificó como mejor ambiente al régimen de riego con densidad de 83,333 plantas ha⁻¹, ya que fue el que mostró la mayor relación positiva con el rendimiento de grano y rentabilidad, seguido de temporal con 83,333 plantas ha⁻¹ y al final riego con 62,500 plantas ha⁻¹ y temporal con 62,500 plantas ha⁻¹ (Figura 2B).

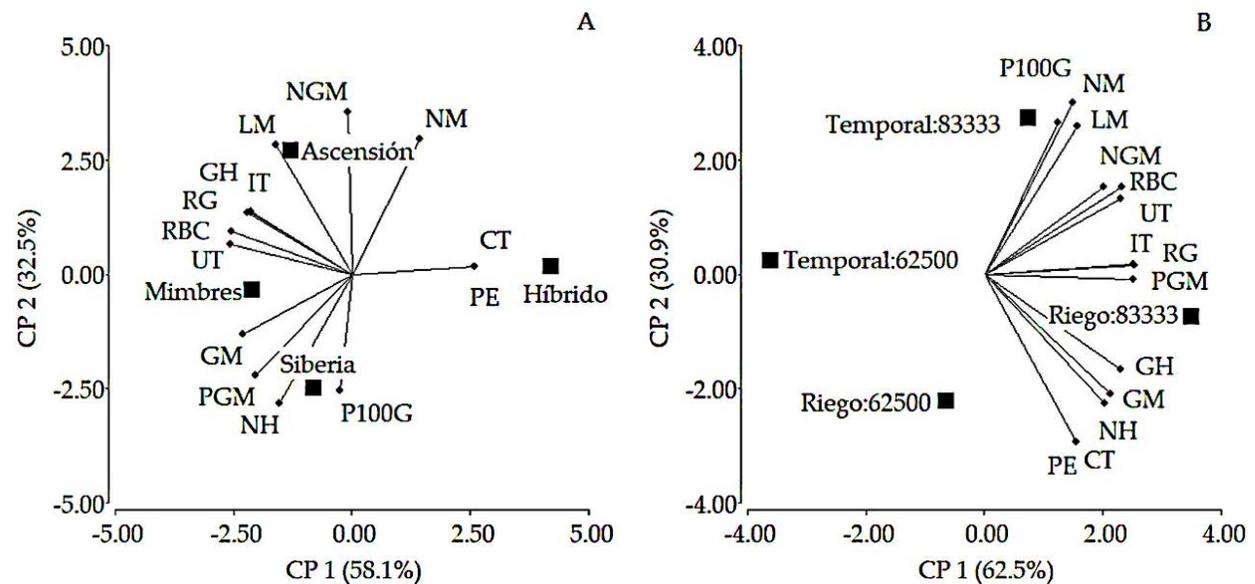


Figura 2. Biplot del análisis de componentes principales de variables agronómicas y de rentabilidad, así como su relación con genotipos de maíz azul (A) y condiciones de producción (B). RG: rendimiento de grano (t ha⁻¹); LM: longitud de mazorca (cm); NH: número de hileras por mazorca; GH: número de granos por hilera; GM: número de granos por mazorca; PGM: peso del grano total de la mazorca (g); P100G: peso de 100 granos (g); NM: número de mazorcas cosechadas por m²; NGM: número de granos por m²; IT: ingreso total; CP: costo de producción; UT: utilidad; PE: punto de equilibrio; RBC: relación beneficio costo.

Análisis de los ambientes de producción

Los resultados del presente estudio mostraron que fue viable producir maíz nativo azul, pues el rendimiento de tales variedades fue igual o superior al rendimiento comercial en zona de estudio, el cuál oscila entre 4.4 t ha⁻¹ en riego y 1.0 t ha⁻¹ en temporal (SIAP, 2024).

Cabe señalar que fue más beneficioso cultivar en riego que en temporal, así como sembrar los maíces nativos a una densidad de 83,333 plantas ha⁻¹, ya que sólo con esta densidad tales maíces obtuvieron ganancias económicas. Esto sugiere que la densidad óptima para los maíces nativos azules aquí evaluados es mayor que las densidades recomendadas para la zona de estudio, las cuales oscilan entre 37,000 y 50,000 plantas ha⁻¹ en temporal y entre 62,000 a 75,000 plantas ha⁻¹ en riego (INIFAP, 2017). Por ello, cultivar los maíces nativos Mimbres, Siberia y Ascensión a una densidad de 83,333 plantas ha⁻¹ es una tecnología que se puede usar para incrementar el rendimiento de grano y la rentabilidad bajo las condiciones de estudio, y que además podrían adoptar más fácilmente los productores, pues no afectaría significativamente su costo de producción, ya que sólo aumentó 70 pesos MXN cuando se cambió de 62,500 a 83,333 plantas ha⁻¹, pues se usaron siete kg más de semilla (3,000 semillas por kg) a un costo de 10 pesos MXN por kg. Cabe destacar que la respuesta del maíz a la densidad de población está influenciada por el genotipo y otros factores de manejo del cultivo, por esta razón es conveniente continuar estudiando otros maíces, densidades y condiciones de producción para complementar estos resultados.

Además, los resultados del presente trabajo resaltan la importancia de analizar la rentabilidad en las evaluaciones de maíz, ya que, algunas prácticas de manejo pueden aumentar el rendimiento de grano, sin embargo, puede no ser suficiente para generar ganancias económicas. Esto pasó al cultivar los maíces a 62,500 plantas ha⁻¹, pues en riego obtuvieron mayor rendimiento comparado con temporal, sin embargo, en ninguna de las dos condiciones se obtuvo rentabilidad positiva.

Los maíces nativos Mimbres, Ascensión y Siberia se consideraron importantes recursos genéticos que, además de usarse de forma *per se*, se podrían usar en programas de fitomejoramiento para tolerancia a la alta densidad, ya que, cuando se incrementó la densidad de plantas aumentaron en aproximadamente el doble su rendimiento de grano (Tabla 2). Lo anterior indica que, a pesar de que tales maíces se cultivan a bajas densidades, ellos tienen capacidad para soportar más competencia por recursos debido al incremento de la densidad de plantas. A pesar de esto, son necesarios más estudios para conocer si estos genotipos podrían tolerar mayores densidades de población, lo que

permitiría continuar mejorando el rendimiento de grano y la rentabilidad. Además, es importante entender el efecto de la interacción entre la densidad de plantas y el estrés por déficit hídrico, pues tal parece que, en condiciones de temporal, la humedad durante el periodo crítico de formación de granos es un componente importante para el éxito al usar alta densidad (Hernández *et al.*, 2020; Ramírez-Díaz *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

Fue viable cultivar los maíces nativos con una densidad de 83,333 plantas ha⁻¹ tanto en riego como en temporal, ya que sólo con esta densidad y tales maíces se logró obtener el mayor rendimiento de grano y ganancias económicas. En este sentido, los maíces nativos Mimbres, Ascensión y Siberia se consideraron importantes recursos genéticos que, además de usarse de forma *per se*, se podrían usar en programas de fitomejoramiento para tolerancia a la alta densidad, ya que, cuando se incrementó la densidad de plantas aumentaron en promedio al doble su rendimiento de grano y la relación beneficio costo. Por ello, aumentar la densidad a 83,333 plantas ha⁻¹ es una estrategia que se podría explorar para incrementar la producción de grano y rentabilidad del maíz azul bajo las condiciones de estudio, además la podrían adoptar más fácilmente los productores, ya que no afectaría significativamente su costo de producción.

Funding. This research did not receive any funding.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Compliance with ethical standards. Do not apply.

Data availability. The datasets generated during the current study are available from the corresponding author on reasonable request (eleazar.lugocr@uanl.edu.mx).

Author contribution statement (CRediT). **R. Armendáriz-Beltrán** - Investigation, formal analysis, writing-original draft, **E. Lugo-Cruz** - Conceptualization, investigation, formal analysis, writing-review and editing, supervision, **R. Ruíz-Hernández** - Investigation, writing-review and editing, **F. Zavala-García** - Investigation, writing-review and editing, **N.C. Ramírez-Grimaldo** - Investigation, Writing-review and editing.

REFERENCES

Aguilar-Carpio, C., Escalante-Estrada, J.A.S., Aguilar-Mariscal, I., Mejía-Contreras, J.A., Conde-Martínez, V.F. and Trinidad-Santos, A., 2015. Rendimiento y rentabilidad de maíz

- en función del genotipo, biofertilizante y nitrógeno, en clima cálido. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 18(2), pp.151–163. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.1953>
- Alemán-Pérez, R.D., Bravo-Medina, C.A. and Ibarra-Tellez, E.M., 2024. Photosynthetic capacity, yield components, and population density of a local corn genotype from Ecuadorian Amazonia. *Agrociencia*, 58(1), pp.1–14. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v58i1.3036>
- Al-Naggar, A.M.M., Shabana, M.R.A., Hassanein, M.S. and Metwally, A.M.A., 2023. Effects of elevated plant density and reduced nitrogen on agronomic and yield attributes of maize inbred lines and their diallel crosses. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 55(5), pp.1843–1854. <https://doi.org/10.54910/sabrao2023.55.5.35>
- Aslam, M., Maqbool, M.A. and Cengiz, R., 2015. *Drought stress in maize (Zea mays L.)*. 1st ed. Springer Briefs in Agriculture. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25442-5>
- Assefa, Y., Prasad, P.V.V., Carter, P., Hinds, M., Bhalla, G., Schon, R., Jeschke, M., Paszkiewicz, S. and Ciampitti, I.A., 2016. Yield responses to planting density for US modern corn hybrids: a synthesis-analysis. *Crop Science*, 56(5), pp.2802–2817. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.04.0215>
- Ayala-Garay, A.V. and Vázquez-Hernández, B., 2024. Rentabilidad de la producción de maíz en sistemas agroecológico y convencional en dos comunidades de Tlaxcala. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 21(1), pp.1–12. <https://doi.org/10.22231/asyd.v21i1.1566>
- Ayvar-Serna, S., Díaz-Nájera, J.F., Vargas-Hernández, M., Mena-Bahena, A., Tejeda-Reyes, M.A. and Cuevas-Apresa, Z., 2020. Rentabilidad de sistemas de producción de grano y forraje de híbridos de maíz, con fertilización biológica y química en trópico seco. *Terra Latinoamericana*, 38(1), pp.9–16. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.507>
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M. and Robledo, C.W., 2020. *Infostat - Software estadístico*. [online] InfoStat versión 2020. Available at: <<https://www.infostat.com.ar/>>.
- Djaman, K., Allen, S., Djaman, D.S., Koudahe, K., Irmak, S., Puppala, N., Darapuni, M.K. and Angadi, S.V., 2022. Planting date and plant density effects on maize growth, yield and water use efficiency. *Environmental Challenges*, 6, p.100417. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100417>
- DOF, 2022. *Reglas de Operación del Programa de Precios de Garantía a Productos Alimentarios Básicos, a cargo de Seguridad Alimentaria Mexicana, SEGALMEX, sectorizada en la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, para el ejercicio fiscal 2023*. [online] Diario Oficial de la Federación. Available at: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5676231&fecha=30/12/2022#gsc.tab=0
- FAO, 2015. *Construyendo una visión común para la agricultura y alimentación sostenibles*. [online] Roma: Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. Available at: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b5da6a68-9cd5-40b1-84f8-3df446066651/content>
- Hellin, J., Bellon, M.R. and Hearne, S.J., 2014. Maize landraces and adaptation to climate change in Mexico. *Journal of Crop Improvement*, 28(4), pp.484–501. <https://doi.org/10.1080/15427528.2014.921800>
- Hernández, M.D., Alfonso, C., Cerrudo, A., Cambareri, M., Della Maggiora, A., Barbieri, P., Echarte, M.M. and Echarte, L., 2020. Eco-physiological processes underlying maize water use efficiency response to plant density under contrasting water regimes. *Field Crops Research*, 254, p.107844. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107844>
- INEGI, 2024. *Mapa digital de México en línea*. [online] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Available at: <https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjIzLjMyMDA4LGxvbjotMTAxLjUwMDAwLHo6MSxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dG MxMTFzZXJ2aWNpb3M=> [Accessed 18 May 2024].
- INIFAP, 2017. *Agenda Técnica Agrícola Nuevo León*. 2nd ed. Ciudad de México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

- INIFAP, 2022. *Laboratorio nacional de modelaje y sensores remotos*. [online] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Available at: <https://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/Index>
- Lowder, S.K., Sánchez, M.V. and Bertini, R., 2021. Which farms feed the world and has farmland become more concentrated? *World Development*, 142, p.105455. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105455>
- McLean-Rodríguez, F.D., Camacho-Villa, T.C., Almekinders, C.J.M., Pè, M.E., Dell'Acqua, M. and Costich, D.E., 2019. The abandonment of maize landraces over the last 50 years in Morelos, Mexico: a tracing study using a multi-level perspective. *Agriculture and Human Values*, 36, pp.651–668. <https://doi.org/10.1007/s10460-019-09932-3>
- Ramírez-Díaz, J.L., Alemán-de la Torre, I., Bautista-Ramírez, E., Vidal-Martínez, V.A., Salinas-Moreno, Y. and Ledesma-Miramontes, A., 2021. Respuesta de híbridos subtropicales de maíz a la densidad de población. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44(2), pp.173–173. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.2.173>
- Saglam, A., Kadioglu, A., Demiralay, M. and Terzi, R., 2014. Leaf rolling reduces photosynthetic loss in maize under severe drought. *Acta Botanica Croatica*, 73(2), pp.315–332.
- Shah, A.N., Tanveer, M., Abbas, A., Yildirim, M., Shah, A.A., Ahmad, M.I., Wang, Z., Sun, W. and Song, Y., 2021. Combating dual challenges in maize under high planting density: stem lodging and kernel abortion. *Frontiers in Plant Science*, 12, p.699085. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699085>
- SIAP, 2024. *Avance de siembras y cosechas*. [online] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Available at: https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/
- Testa, G., Reyneri, A. and Blandino, M., 2016. Maize grain yield enhancement through high plant density cultivation with different inter-row and intra-row spacings. *European Journal of Agronomy*, 72, pp.28–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.006>
- Thompson, W.H., Pietsch, D., Blumenthal, J.M., Ibrahim, A.M.H. and Baltensperger, D.D., 2013. Agronomic optimum seeding rate for irrigated maize in Texas is concomitant to growing season mean daily minimum temperature. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199(4), pp.299–307. <https://doi.org/10.1111/jac.12015>
- Yan, P., Pan, J., Zhang, W., Shi, J., Chen, X. and Cui, Z., 2017. A high plant density reduces the ability of maize to use soil nitrogen. *PLoS ONE*, 12(2), p.e0172717. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172717>
- Zhang, Y., Xu, Z., Li, J. and Wang, R., 2021. Optimum planting density improves resource use efficiency and yield stability of rainfed maize in semiarid climate. *Frontiers in Plant Science*, 12, p.752606. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.752606>