Agronomía Mesoamericana

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Artículo científico

Volumen 37: Artículo 9zb7wj95, 2026
e-ISSN 2215-3608, https://doi.org/10.15517/9zb7wj95

Respuesta fenológica y productiva de genotipos de quinua a densidades de siembra en Cauca, Colombia*

Phenological and productive response of quinoa genotypes to sowing densities in Cauca, Colombia

Miguel Adolfo Pizo-Ossa[1, 2]

* Recepción: 8 de junio, 2026. Aceptación: 3 de septiembre, 2026. Artículo derivado de la tesis de maestría "Caracterización morfoagronómica de germoplasma de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en Colombia", realizada por el autor en la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Palmira, Valle del Cauca, Colombia. El trabajo contó con apoyo de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

[1] Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira, Valle del Cauca, Colombia. mpizo@unal.edu.co (https://orcid.org/0000-0002-7754-1310; autor para correspondencia).

[2] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Palmira. Palmira, Valle del Cauca, Colombia.

Resumen

Introducción. La densidad de siembra es un factor agronómico clave para regular la competencia entre plantas y optimizar la expresión fenológica y productiva de la quinua en ambientes altoandinos. **Objetivo.** Evaluar el efecto de la densidad de siembra y su interacción con el genotipo sobre la fenología, la arquitectura de la planta y el rendimiento del grano de testigos comerciales y familias mejoradas de quinua bajo condiciones altoandinas del municipio de Silvia, Cauca, Colombia. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó durante el segundo semestre de 2024 en Silvia, Cauca, Colombia, a 2570 m s. n. m. Se evaluaron cinco genotipos de quinua: dos testigos comerciales, Blanca de Jericó y Aurora, y tres familias mejoradas, Fel56, FelSJ y Fel86. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 3 × 5 y tres repeticiones. Se evaluaron tres arreglos de siembra: distanciamientos de 0,80 × 0,50 m y 0,70 × 0,10 m, y siembra a chorrillo con 0,70 m entre surcos. Se registraron variables morfoagronómicas, fenológicas y productivas, y los datos se analizaron mediante análisis de varianza y prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). **Resultados.** La densidad de siembra, el genotipo y su interacción afectaron la mayoría de las variables evaluadas. El distanciamiento más amplio favoreció el crecimiento vegetativo y prolongó el ciclo fenológico, mientras que la siembra a chorrillo aceleró el desarrollo y redujo el desempeño productivo. La densidad intermedia produjo los mayores rendimientos en las familias FelSJ y Fel56. **Conclusiones.** La interacción densidad × genotipo explicó diferencias en arquitectura, duración fenológica y eficiencia productiva. Las familias mejoradas mostraron mayor respuesta al arreglo espacial intermedio, lo que aportó criterios para orientar el manejo agronómico y la selección de materiales de quinua en ambientes altoandinos.

Palabras clave: competencia intraespecífica, cultivos andinos, germoplasma vegetal, fitomejoramiento, plasticidad fenotípica.

Agronomía Mesoamericana es desarrollada en la Universidad de Costa Rica bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para más información escriba a pccmca@ucr.ac.cr o pccmca@gmail.com

Abstract

Introduction. Sowing density is a key agronomic factor for regulating plant competition and optimizing the phenological and productive expression of quinoa in high-Andean environments. **Objective.** To evaluate the effect of sowing density and its interaction with genotype on phenology, plant architecture, and grain yield of commercial checks and improved quinoa families under high-Andean conditions in the municipality of Silvia, Cauca, Colombia. **Materials and methods.** The study was conducted during the second semester of 2024 in Silvia, Cauca, Colombia, at 2570 m a.s.l. Five quinoa genotypes were evaluated: two commercial checks, Blanca de Jericó and Aurora, and three improved families, Fel56, FelSJ, and Fel86. A randomized complete block design with a 3 × 5 factorial arrangement and three replications was used. Three sowing arrangements were evaluated: spacings of 0.80 × 0.50 m and 0.70 × 0.10 m, and continuous row sowing with 0.70 m between rows. Morpho-agronomic, phenological, and productive variables were recorded, and data were analyzed using analysis of variance and Tukey's test ($\alpha = 0.05$). **Results.** Sowing density, genotype, and their interaction affected most of the evaluated variables. The widest spacing favored vegetative growth and prolonged the phenological cycle, whereas continuous row sowing accelerated development and reduced productive performance. The intermediate density resulted in the highest yields in FelSJ and Fel56. **Conclusions.** The sowing density × genotype interaction explained differences in plant architecture, phenological duration, and productive efficiency. The improved families showed a greater response to the intermediate spatial arrangement, providing criteria to guide agronomic management and the selection of quinoa materials in high-Andean environments.

Keywords: intraspecific competition, Andean crops, plant germplasm, plant breeding, phenotypic plasticity.

Introducción

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un cultivo ancestral originario de la región andina de Suramérica, con amplia distribución en Perú, Bolivia, Ecuador y Colombia (Delgado et al., 2024). Ha sido conservada y utilizada por comunidades indígenas desde épocas preincaicas (Morillo-Coronado et al., 2022). En las últimas décadas, la especie ha adquirido importancia estratégica por su valor nutricional, adaptación agroecológica y potencial para contribuir a la seguridad alimentaria en escenarios de variabilidad y cambio climático (Al Jbawi et al., 2022).

El grano de quinua presenta entre 13,8 y 21,9 % de proteína, según el genotipo y las condiciones de cultivo (Bazile et al., 2016). También posee un perfil equilibrado de aminoácidos esenciales, lo que refuerza su valor como alimento funcional (Antognoni et al., 2021). Estos atributos han respaldado su expansión como cultivo de interés agrícola, nutricional y agroindustrial en diferentes regiones productoras de Suramérica (Laouedj et al., 2023).

En Colombia, la quinua se cultiva principalmente en Boyacá, Cundinamarca, Nariño y Cauca, donde representa una alternativa productiva para pequeños y medianos agricultores por su adaptación a condiciones altoandinas y su potencial económico (Montes-Rojas et al., 2018). En el Cauca, el cultivo se concentra en zonas del Macizo Colombiano, caracterizadas por elevada heterogeneidad ambiental (Montes-Rojas et al., 2020; Pizo-Ossa et al., 2025). En estas condiciones, materiales comerciales como Blanca de Jericó y Aurora han mostrado adaptación agronómica y aceptación agroindustrial (Pizo-Ossa et al., 2024).

La variabilidad genética y fenotípica documentada en materiales cultivados y familias mejoradas de quinua se expresa en diferencias morfológicas, fenológicas y productivas (Pizo-Ossa et al., 2024). Esta variación puede condicionar la respuesta de cada genotipo al ambiente y al manejo agronómico. Por ello, la evaluación de materiales contrastantes permite identificar criterios útiles para ajustar prácticas de cultivo en sistemas altoandinos.

El manejo agronómico de la quinua aún presenta limitaciones relacionadas con la definición de densidades de siembra que favorezcan la expresión del potencial productivo de cada material genético. En condiciones de manejo mejorado, se han reportado rendimientos entre 2200 y 2500 kg ha^{-1}; estos valores pueden variar según el genotipo, el ambiente y el arreglo espacial utilizado (Montes-Rojas et al., 2020).

Los cambios en densidad de siembra pueden modificar el crecimiento, la duración del ciclo fenológico, la arquitectura de la planta y los componentes del rendimiento. Este factor regula la competencia por luz, agua, nutrientes y espacio, y puede influir en la asignación de biomasa hacia estructuras reproductivas (Estrada-Zúñiga et al., 2022; Montes-Rojas et al., 2020). Estudios realizados bajo diferentes condiciones de cultivo han evidenciado que la densidad de siembra modifica el crecimiento y el rendimiento de la quinua, aunque la magnitud de la respuesta depende del ambiente, del manejo agronómico y del material genético evaluado (Al Jbawi et al., 2022; Montes-Rojas et al., 2020; Wang et al., 2022).

La magnitud de la respuesta a la densidad de siembra depende del genotipo, lo que resalta la importancia de evaluar conjuntamente ambos factores (Anchico-Jojoa et al., 2023). Los materiales comerciales y las familias mejoradas pueden diferir en precocidad, arquitectura de la planta, capacidad de ramificación, tamaño de la panoja, peso del grano y eficiencia productiva (Madrid et al., 2018). Por ello, la densidad de siembra no debe recomendarse de manera general, sino ajustarse al comportamiento de cada genotipo.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la densidad de siembra y su interacción con el genotipo sobre la fenología, la arquitectura de la planta y el rendimiento del grano de testigos comerciales y familias mejoradas de quinua bajo condiciones altoandinas del municipio de Silvia, Cauca, Colombia.

Materiales y métodos

Localización del experimento

El estudio se realizó durante el segundo semestre de 2024 en la vereda San Fernando, municipio de Silvia, departamento del Cauca, Colombia, en territorio de la comunidad indígena Misak. El sitio experimental se ubicó a 2570 m s. n. m., en las coordenadas 2,629183° N; –76,341597° O. La climatología de WorldClim v2.1 registró una temperatura media anual de 12,25 °C y una precipitación anual de 1492 mm, mientras que la humedad relativa reportada para la zona es cercana al 80 %. El ensayo se estableció en un lote con manejo convencional, representativo de los sistemas productivos altoandinos donde se cultiva quinua.

Material vegetal

Se evaluaron cinco genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.): dos testigos comerciales, Blanca de Jericó y Aurora, y tres familias mejoradas de quinua dulce identificadas como Fel56, FelSJ y Fel86. Las familias mejoradas correspondieron a materiales de la generación filial F8, obtenidos mediante la selección de segregantes provenientes del cruzamiento Aurora × Tunkahuan, la cual estuvo orientada a mejorar la arquitectura de la planta, la precocidad, la calidad del grano y el potencial productivo. La descripción general de los materiales evaluados se presenta en el Cuadro 1, con base en características morfoagronómicas y fenológicas previamente reportadas para estos materiales y genotipos de quinua (Pizo-Ossa et al., 2024).

Cuadro 1. Características generales de los testigos comerciales y las familias mejoradas de quinua evaluados en Silvia, Cauca, Colombia, segundo semestre de 2024.

Table 1. General characteristics of commercial checks and improved quinoa families evaluated in Silvia, Cauca, Colombia, second semester of 2024.

Genotipo	Tipo de material	Altura de la planta	Arquitectura de la panoja	Características del grano
Blanca de Jericó	Testigo comercial	120-200 cm	Panoja verde, ramificada, con panojas secundarias	Blanco, dulce, libre de saponina
Aurora	Testigo comercial	90-130 cm	Panoja blanca a rosada, semicompacta, con ramificaciones cortas	Blanco, pequeño, expuesto en madurez
Fel56	Familia mejorada	70-90 cm	Panoja compacta, con baja presencia de panojas secundarias	Dulce, seleccionado por calidad
FelSJ	Familia mejorada	70-90 cm	Panoja compacta, verde en floración y anaranjada en madurez	Dulce, seleccionado por calidad
Fel86	Familia mejorada	70-90 cm	Panoja compacta, con baja ramificación	Dulce, seleccionado por calidad

Elaboración propia con base en Pizo-Ossa et al. (2024). / Prepared by the author based on Pizo-Ossa et al. (2024).

Manejo agronómico del cultivo

La unidad experimental correspondió a cada parcela asignada a una combinación específica de genotipo × arreglo de siembra, manteniendo la misma superficie entre los tratamientos. La preparación del terreno se realizó de forma homogénea en todas las unidades experimentales; antes de la siembra, se efectuó el control mecánico de arvenses con guadaña y la labranza con motocultor, con el propósito de favorecer la aireación del suelo y el establecimiento inicial del cultivo. La siembra se realizó a una profundidad aproximada de 3-5 cm, de acuerdo con el arreglo espacial definido para cada tratamiento.

La fertilización se basó en insumos de origen orgánico. Como enmienda de base, se incorporó estiércol compostado 20 días antes de la siembra. Durante el ciclo del cultivo, se aplicó el fertilizante orgánico líquido A. L. O. F. A., obtenido por fermentación aeróbica de material vegetal y enriquecido con componentes organominerales, ácidos húmicos y fúlvicos. La aplicación del fertilizante orgánico se realizó cada 20 días mediante aspersión foliar y aplicación dirigida al suelo, a una dosis de 50 mL L^{-1}, equivalente a 1 L de fertilizante por bomba de espalda de 20 L.

El manejo del cultivo incluyó el control manual de arvenses, el raleo y el aporque, con el fin de disminuir la competencia, favorecer la uniformidad poblacional y mejorar el anclaje de las plantas. El manejo fitosanitario se realizó mediante monitoreos periódicos y, cuando fue necesario, se aplicaron preparados vegetales a base de ajo, ají y cebolla. Además, se mantuvo una cobertura con residuos vegetales para reducir la erosión y conservar la humedad del suelo. La cosecha se efectuó manualmente cuando las panojas alcanzaron la madurez de cosecha.

Variables evaluadas

Se evaluaron variables morfoagronómicas, fenológicas y productivas para determinar la respuesta de los genotipos de quinua a las densidades de siembra. Las variables morfoagronómicas incluyeron la altura de la planta (cm), la longitud de la panoja (cm), el diámetro de la panoja (mm) y el diámetro del tallo (mm). Las variables productivas correspondieron al rendimiento del grano (kg ha^{-1}) y al peso de mil granos (g).

Las variables fenológicas se expresaron en días después de la siembra y se determinaron mediante un seguimiento cada siete días. Cada etapa se registró cuando más del 50 % de las plantas de la unidad experimental alcanzó la característica fenológica correspondiente. Las etapas evaluadas fueron emergencia, aparición de dos, cuatro y seis hojas verdaderas, ramificación del tallo, inicio de la formación de la panoja, formación de la panoja, inicio de la floración, floración, grano lechoso, grano pastoso, madurez fisiológica y madurez de cosecha.

Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial, constituido por tres arreglos topológicos de siembra y cinco genotipos de quinua, con tres repeticiones por tratamiento. Los arreglos evaluados fueron 0,80 × 0,50 m, 0,70 × 0,10 m y siembra a chorrillo con 0,70 m entre surcos, equivalentes a 25 000 plantas ha^{-1}, 142 857 plantas ha^{-1} y 285 714 plantas ha^{-1}, respectivamente. En la siembra a chorrillo, la semilla se distribuyó de forma continua sobre el surco, y la densidad poblacional se estimó con base en una población aproximada de 20 plantas por metro lineal. El primer arreglo correspondió al sistema tradicional utilizado por productores locales.

Las unidades experimentales mantuvieron la misma área en todos los tratamientos, mientras que las diferencias poblacionales correspondieron al arreglo topológico evaluado. Para asegurar la comparabilidad entre tratamientos, las mediciones se realizaron en 15 plantas ubicadas en la parte central de cada unidad experimental y se excluyeron las plantas de borde. Esta estrategia permitió reducir el efecto de borde y mantener criterios uniformes de evaluación entre los arreglos espaciales.

Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva e inferencial. Para cada variable se calcularon la media y el coeficiente de variación como medidas de tendencia central y dispersión, respectivamente. Antes del análisis inferencial se verificaron los supuestos de normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene.

Una vez verificado el cumplimiento de los supuestos, se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) y, cuando se detectaron diferencias significativas, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey, con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Asimismo, se estimó la productividad diaria como la relación entre el rendimiento del grano (kg ha^{-1}) y los días hasta la madurez de cosecha, expresada en kg ha^{-1} $día^{-1}$. Los análisis estadísticos se realizaron en R, versión 4.3.

Resultados

Variables agronómicas y productivas

El ANDEVA evidenció efectos significativos de la densidad de siembra, el genotipo y la interacción densidad × genotipo sobre todas las variables agronómicas y productivas evaluadas (Cuadro 2). La densidad de siembra presentó un efecto altamente significativo sobre altura de la planta, longitud de la panoja, diámetro de la panoja, diámetro del tallo, peso de mil granos y rendimiento del grano ($p < 0,01$). De igual manera, el factor genotipo mostró diferencias altamente significativas en todas las variables de respuesta ($p < 0,01$), lo que confirmó la variabilidad morfoagronómica y productiva entre los materiales evaluados. La interacción densidad × genotipo también fue significativa para todas las variables; para la altura de la planta, la longitud de la panoja, el diámetro de la panoja y el diámetro del tallo, se obtuvieron valores de $p < 0,01$, mientras que, para el peso de mil granos y el rendimiento del grano, la significancia fue de $p < 0,05$.

Cuadro 2. Valores de *p* del análisis de varianza para variables agronómicas y productivas de genotipos de quinua evaluados en tres densidades de siembra en Silvia, Cauca, Colombia, segundo semestre de 2024.

Table 2. *P*-values from the analysis of variance for agronomic and yield-related variables of quinoa genotypes evaluated under three sowing densities in Silvia, Cauca, Colombia, during the second half of 2024.

Fuente de variación	AP (cm)	LP (cm)	DP (mm)	DT (mm)	PMG (g)	R (kg ha^{-1})
Densidad de siembra (D)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0001	0,0001
Genotipo (G)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Repetición	<0,0001	0,0697	0,4587	0,4587	0,0297	0,2630
D × G	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0466	0,0118
CV (%)	8,88	14,70	13,97	7,13	14,61	1,83

AP: Altura de la planta. **LP:** Longitud de la panoja. **DP:** Diámetro de la panoja. **DT:** Diámetro del tallo. **PMG:** Peso de mil granos. **R:** Rendimiento del grano. **D:** Densidad de siembra. **G:** Genotipo. **CV:** Coeficiente de variación. / **AP:** Plant height. **LP:** Panicle length. **DP:** Panicle diameter. **DT:** Stem diameter. **PMG:** Thousand-grain weight. **R:** Grain yield. **D:** Sowing density. **G:** Genotype. **CV:** Coefficient of variation.

La interacción densidad × genotipo presentó un efecto significativo sobre las variables agronómicas y productivas evaluadas (Cuadro 3). Para la altura de la planta, los mayores valores se registraron con la densidad 0,80 × 0,50 m, equivalente a 25 000 plantas ha^{-1}, principalmente en los testigos comerciales Blanca de Jericó y Aurora, con 183,8 y 171,2 cm, respectivamente. En contraste, la siembra a chorrillo redujo de forma marcada la

Cuadro 3. Comparación de medias de la interacción densidad × genotipo mediante la prueba de Tukey (α = 0,05) para variables agronómicas y productivas de quinua en Silvia, Cauca, Colombia, segundo semestre de 2024.

Table 3. Mean comparison of the density × genotype interaction using Tukey's test (α = 0.05) for agronomic and yield-related variables of quinoa in Silvia, Cauca, Colombia, during the second half of 2024.

Genotipo	Densidad	AP (cm)	LP (cm)	DP (mm)	DT (mm)	PMG (g)	R (kg ha^{-1})
Blanca de Jericó	D1	183,8 a	77,2 a	83,1 b	22,3 b	2,18 c	4402,7 d
Blanca de Jericó	D2	133,7 d	54,3 d	60,7 d	15,9 d	2,14 c	4161,4 de
Blanca de Jericó	D3	118,8 e	25,0 g	49,1 e	11,7 f	2,19 c	3898,7 e
Aurora	D1	171,2 b	68,7 b	80,7 b	22,6 b	2,13 c	4302,7 de
Aurora	D2	120,0 e	49,6 d	57,5 d	16,2 d	2,02 d	4401,7 d
Aurora	D3	99,0 f	22,9 g	45,1 e	11,2 f	2,18 c	3791,6 e
Fel56	D1	152,9 c	60,9 c	92,8 a	23,6 a	2,80 b	5533,3 b
Fel56	D2	106,5 f	46,5 e	68,3 c	16,7 d	2,74 b	6436,0 a
Fel56	D3	62,9 h	21,9 g	30,0 f	8,5 g	2,84 b	5308,3 b
FelSJ	D1	127,8 d	53,6 d	79,8 b	22,1 b	3,00 a	5938,3 ab
FelSJ	D2	89,3 g	38,4 f	57,8 d	15,9 d	2,81 b	6487,9 a
FelSJ	D3	53,9 h	18,8 h	29,6 f	8,6 g	3,03 a	5300,3 b
Fel86	D1	115,8 e	54,3 d	88,6 a	20,2 c	2,97 a	5060,0 c
Fel86	D2	83,3 g	40,5 f	63,3 c	14,5 e	3,00 a	5202,8 bc
Fel86	D3	55,4 h	24,4 g	28,5 f	8,1 g	3,00 a	4254,0 de

D1: 0,80 × 0,50 m. **D2:** 0,70 × 0,10 m. **D3:** Siembra a chorrillo. **AP:** Altura de la planta. **LP:** Longitud de la panoja. **DP:** Diámetro de la panoja. **DT:** Diámetro del tallo. **PMG:** Peso de mil granos. **R:** Rendimiento del grano. Medias seguidas por la misma letra dentro de cada columna no difieren significativamente según la prueba de Tukey (α = 0,05). / **D1:** 0.80 × 0.50 m. **D2:** 0.70 × 0.10 m. **D3:** Continuous row sowing. **AP:** Plant height. **LP:** Panicle length. **DP:** Panicle diameter. **DT:** Stem diameter. **PMG:** Thousand-grain weight. **R:** Grain yield. Means followed by the same letter within each column do not differ significantly according to Tukey's test (α = 0.05).

ISSN 2215-3608 https://doi.org/10.15517/9zb7wj95

altura; los menores valores correspondieron a FelSJ y Fel86, que alcanzaron 53,9 y 55,4 cm, respectivamente. Para la longitud de la panoja se observó un comportamiento similar: la densidad 0,80 × 0,50 m favoreció las mayores longitudes, en especial en Blanca de Jericó y Aurora, mientras que con la siembra a chorrillo se registraron valores iguales o inferiores a 25 cm (Figura 1).

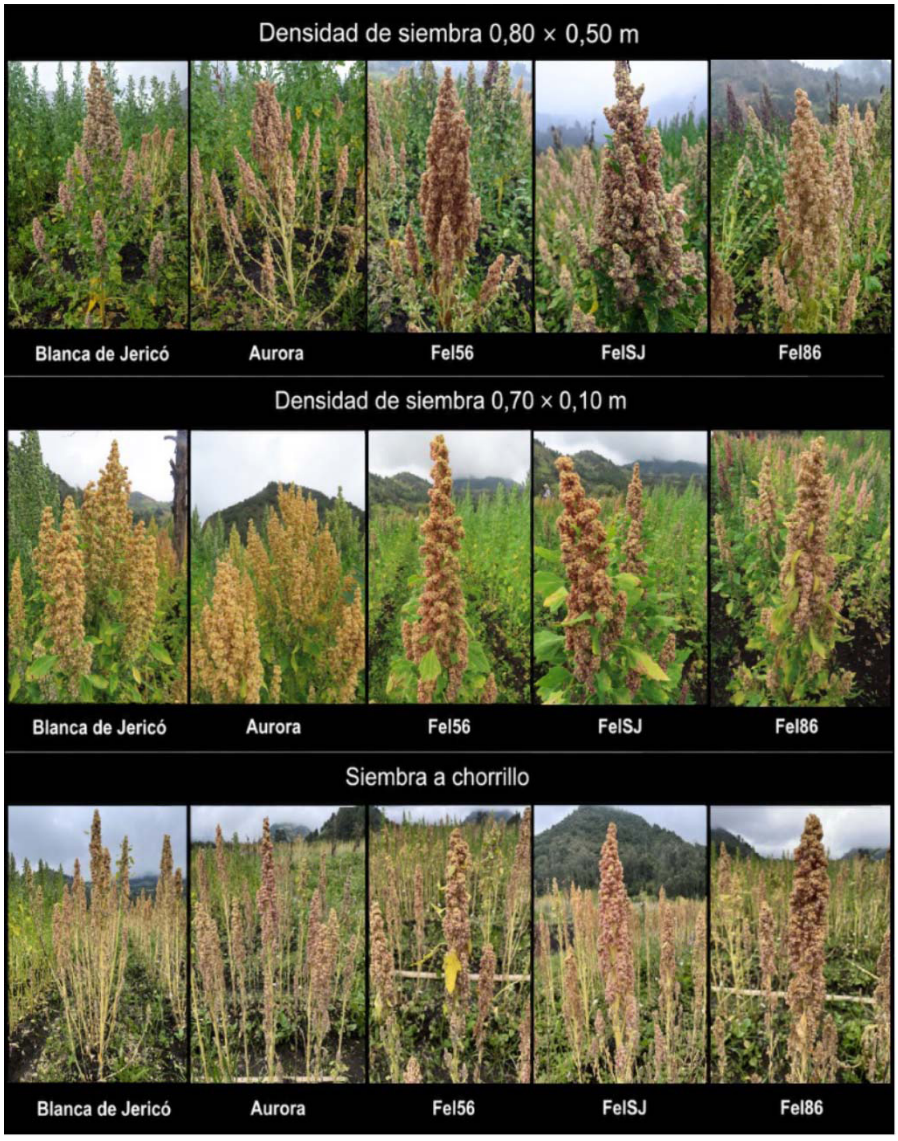

Figura 1. Arquitectura de la planta de cinco genotipos de quinua evaluados con tres densidades de siembra en Silvia, Cauca, Colombia, segundo semestre de 2024.

Figure 1. Plant architecture of five quinoa genotypes evaluated under three sowing densities in Silvia, Cauca, Colombia, during the second half of 2024.

El peso de mil granos presentó diferencias entre las combinaciones genotipo × arreglo de siembra (Cuadro 3). Fel86 se ubicó en el grupo estadístico superior con los tres arreglos evaluados, con valores entre 2,97 y 3,00 g. En contraste, los testigos Blanca de Jericó y Aurora presentaron los menores valores de peso de mil granos en los arreglos evaluados. Para el rendimiento del grano, con el arreglo 0,70 × 0,10 m se obtuvieron los mayores valores numéricos, principalmente en FelSJ y Fel56, con 6487,9 y 6436,0 kg ha^{-1}, respectivamente. Los menores rendimientos se observaron con la siembra a chorrillo en Blanca de Jericó y Aurora, con 3898,7 y 3791,6 kg ha^{-1}, respectivamente (Figura 2).

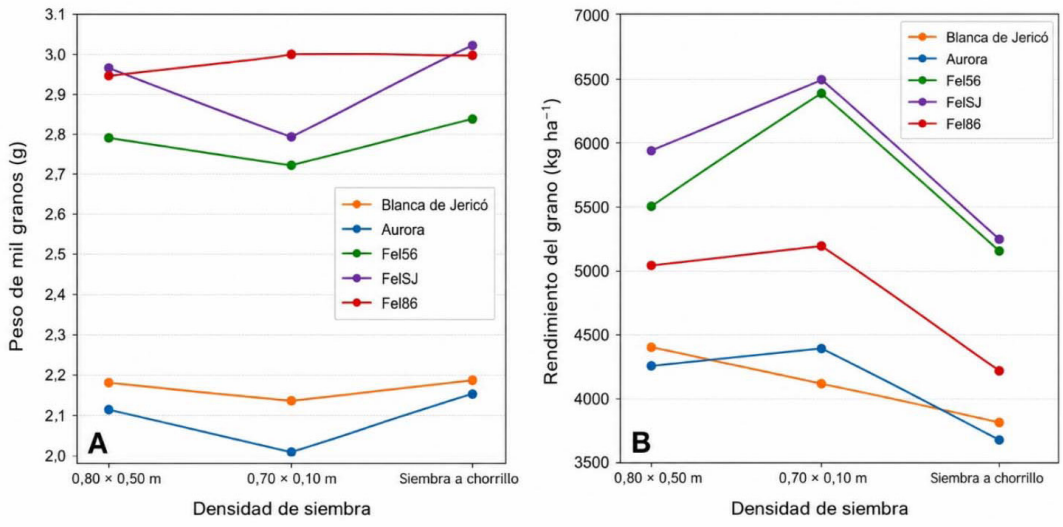

Figura 2. Efecto de la interacción densidad de siembra × genotipo sobre el peso de mil granos (A) y el rendimiento del grano de quinua (B) en Silvia, Cauca, Colombia, segundo semestre de 2024.

Figure 2. Effect of the sowing density × genotype interaction on thousand-grain weight (A) and grain yield of quinoa (B) in Silvia, Cauca, Colombia, during the second half of 2024.

Variables fenológicas

El ANDEVA mostró que la densidad de siembra tuvo un efecto significativo sobre todas las variables fenológicas evaluadas, desde la emisión de hojas verdaderas hasta la madurez de cosecha (Cuadro 4). Este resultado evidenció que el arreglo espacial modificó la duración de las fases de desarrollo del cultivo. El genotipo también presentó un efecto significativo en todas las variables analizadas. En días a cuatro hojas verdaderas, se obtuvo un valor de $p = 0,05$, lo que indicó diferencias fenológicas entre los testigos comerciales y las familias mejoradas.

La interacción densidad × genotipo fue significativa desde la ramificación del tallo hasta la madurez de cosecha (Cuadro 4). Durante las fases intermedias del desarrollo, la densidad 0,80 × 0,50 m prolongó el ciclo fenológico de los genotipos evaluados (Cuadro 5). En esta condición, los testigos comerciales Blanca de Jericó y Aurora presentaron el mayor número de días hasta la ramificación del tallo, el inicio de la formación de la panoja y la formación de la panoja, mientras que las familias Fel56, FelSJ y Fel86 alcanzaron estas etapas en menos días. Con la densidad 0,70 × 0,10 m se observaron valores intermedios, mientras que con la siembra a chorrillo se registró un menor número de días hasta las etapas vegetativas y reproductivas, lo que reflejó un desarrollo fenológico más rápido.

Cuadro 4. Valores de *p* del análisis de varianza para variables fenológicas de genotipos de quinua evaluados con tres densidades de siembra en Silvia, Cauca, Colombia, segundo semestre de 2024.

Table 4. *P*-values from the analysis of variance for phenological variables of quinoa genotypes evaluated under three sowing densities in Silvia, Cauca, Colombia, during the second half of 2024.

Fuente	DH2	DH4	DH6	RT	IFP	FP	IF	FL	GL	GP	MF	MC
Densidad	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Genotipo	<0,01	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Repetición	0,31	0,03	0,24	0,10	0,28	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,15	0,04
D × G	0,44	0,12	0,07	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,04
CV (%)	2,0	6,7	3,3	0,7	1,5	1,7	1,6	1,3	1,5	1,0	1,7	4,3

DH2: Días a dos hojas verdaderas. **DH4:** Días a cuatro hojas verdaderas. **DH6:** Días a seis hojas verdaderas. **RT:** Ramificación del tallo. **IFP:** Inicio de la formación de la panoja. **FP:** Formación de la panoja. **IF:** Inicio de la floración. **FL:** Floración. **GL:** Grano lechoso. **GP:** Grano pastoso. **MF:** Madurez fisiológica. **MC:** Madurez de cosecha. **D:** Densidad de siembra. **G:** Genotipo. **CV:** Coeficiente de variación. / **DH2:** Days to two true leaves. **DH4:** Days to four true leaves. **DH6:** Days to six true leaves. **RT:** Stem branching. **IFP:** Panicle initiation. **FP:** Panicle formation. **IF:** Flowering initiation. **FL:** Flowering. **GL:** Milky grain stage. **GP:** Dough grain stage. **MF:** Physiological maturity. **MC:** Harvest maturity. **D:** Sowing density. **G:** Genotype. **CV:** Coefficient of variation.

Cuadro 5. Comparación de medias de la interacción densidad × genotipo mediante la prueba de Tukey (α = 0,05) para variables fenológicas de quinua en Silvia, Cauca, Colombia, segundo semestre de 2024.

Table 5. Mean comparison of the density × genotype interaction using Tukey's test (α = 0.05) for phenological variables of quinoa in Silvia, Cauca, Colombia, during the second half of 2024.

Genotipo	Densidad	RT	IFP	FP	IF	FL	GL	GP	MF	MC
Blanca de Jericó	D1	117,7 a	123,3 a	141,0 a	149,2 a	155,6 a	162,7 a	170,4 a	193,3 a	216,1 a
Blanca de Jericó	D2	95,0 c	100,0 c	119,0 c	124,0 c	129,0 c	132,6 c	146,5 c	179,5 b	189,5 b
Blanca de Jericó	D3	40,0 f	43,5 f	48,5 f	60,5 f	67,5 g	91,5 f	103,5 f	140,4 c	147,4 c
Aurora	D1	102,6 b	107,1 b	127,4 b	133,0 b	136,1 b	142,3 b	159,1 b	194,1 a	204,8 a
Aurora	D2	93,0 c	96,6 c	116,6 c	121,3 c	125,3 c	129,6 c	142,2 c	170,9 b	176,2 b
Aurora	D3	40,0 f	43,5 f	48,5 f	60,5 f	67,5 g	89,5 f	98,4 f	135,4 c	140,6 c
Fel56	D1	76,0 d	84,3 d	91,9 d	106,7 d	110,7 d	120,5 d	131,5 d	139,9 c	160,4 c
Fel56	D2	69,5 e	77,9 e	85,5 e	97,9 e	102,0 e	111,6 e	122,2 e	129,7 d	147,9 c
Fel56	D3	40,0 f	43,5 f	48,5 f	63,9 f	71,5 f	82,5 g	91,5 g	97,5 e	120,2 d
FelSJ	D1	74,6 d	85,4 d	92,7 d	107,6 d	111,8 d	122,1 d	133,2 d	139,2 c	153,9 c
FelSJ	D2	69,5 e	79,0 e	86,5 e	98,9 e	103,0 e	113,0 e	123,6 e	128,8 d	142,6 c
FelSJ	D3	40,0 f	43,5 f	48,5 f	63,9 f	71,5 f	82,5 g	91,5 g	97,5 e	105,5 d
Fel86	D1	75,6 d	84,3 d	92,6 d	106,2 d	109,7 d	119,4 d	131,6 d	139,7 c	154,4 c
Fel86	D2	69,5 e	77,9 e	85,5 e	97,9 e	102,1 e	111,6 e	122,3 e	129,7 d	142,6 c
Fel86	D3	40,0 f	43,5 f	48,5 f	65,5 f	73,5 f	84,5 g	92,5 g	97,5 e	107,5 d

Los valores se expresan en días después de la siembra. **D1:** 0,80 × 0,50 m. **D2:** 0,70 × 0,10 m. **D3:** Siembra a chorrillo. **RT:** Ramificación del tallo. **IFP:** Inicio de la formación de la panoja. **FP:** Formación de la panoja. **IF:** Inicio de la floración. **FL:** Floración. **GL:** Grano lechoso. **GP:** Grano pastoso. **MF:** Madurez fisiológica. **MC:** Madurez de cosecha. Medias seguidas por la misma letra dentro de cada columna no difieren significativamente según la prueba de Tukey (α = 0,05). / Values are expressed as days after sowing. **D1:** 0.80 × 0.50 m. **D2:** 0.70 × 0.10 m. **D3:** Continuous row sowing. **RT:** Stem branching. **IFP:** Panicle initiation. **FP:** Panicle formation. **IF:** Flowering initiation. **FL:** Flowering. **GL:** Milky grain stage. **GP:** Dough grain stage. **MF:** Physiological maturity. **MC:** Harvest maturity. Means followed by the same letter within each column do not differ significantly according to Tukey's test (α = 0.05).

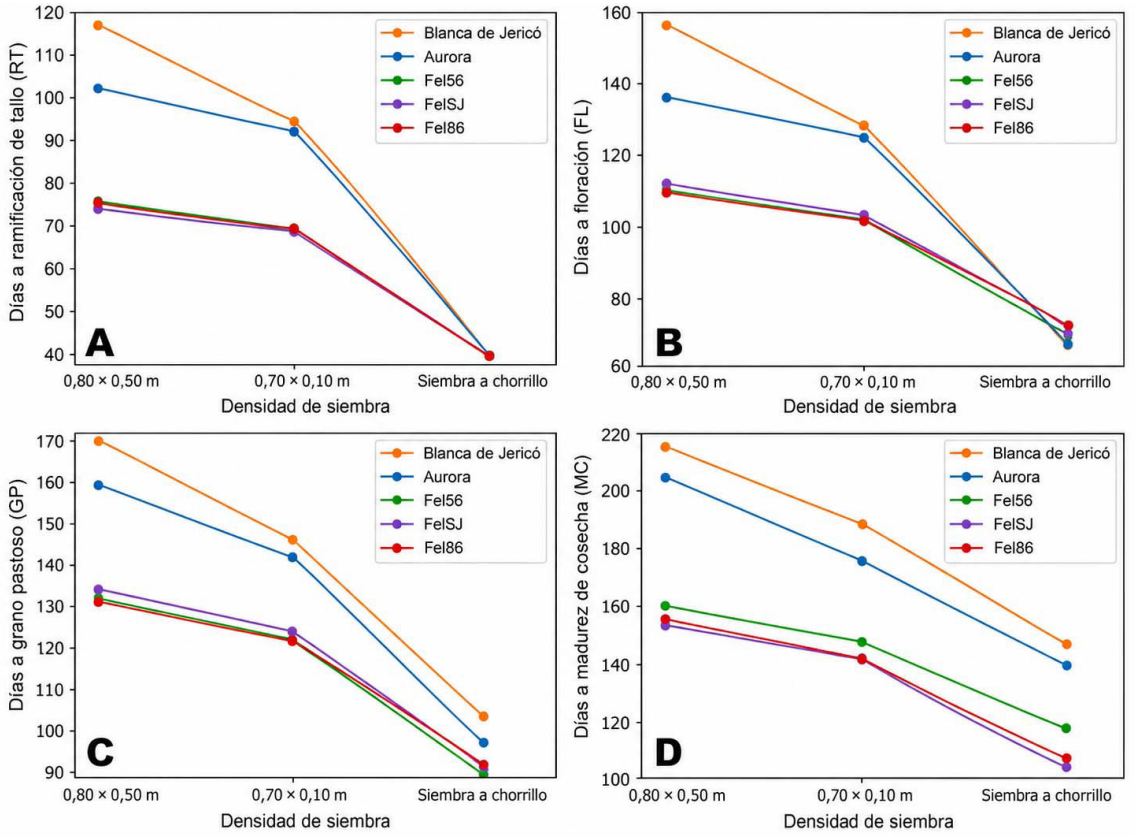

Figura 3. Días hasta etapas fenológicas clave de genotipos de quinua evaluados con tres densidades de siembra: ramificación del tallo (A), floración (B), grano pastoso (C) y madurez de cosecha (D), en Silvia, Cauca, Colombia, segundo semestre de 2024.

Figure 3. Days to key phenological stages of quinoa genotypes evaluated under three sowing densities: stem branching (A), flowering (B), dough grain stage (C), and harvest maturity (D), in Silvia, Cauca, Colombia, during the second half of 2024.

La mayor duración fenológica registrada con el arreglo 0,80 × 0,50 m y la menor duración observada con la siembra a chorrillo se mantuvieron hasta las fases de madurez fisiológica y madurez de cosecha. Los ciclos más prolongados se registraron en Blanca de Jericó y Aurora con el arreglo 0,80 × 0,50 m, mientras que las familias mejoradas presentaron menor duración fenológica. Con la siembra a chorrillo, se registró el ciclo total más corto en todos los genotipos, y con el arreglo 0,70 × 0,10 m se observaron valores intermedios (Figura 3).

Cuando el rendimiento se expresó en función del tiempo, con la densidad 0,70 × 0,10 m se obtuvieron los mayores valores de productividad diaria, principalmente en FelSJ y Fel56, con aproximadamente 45,5 y 43,5 kg ha^{-1} $día^{-1}$, respectivamente. En contraste, con esta misma densidad, Blanca de Jericó y Aurora registraron aproximadamente 22,0 y 25,0 kg ha^{-1} $día^{-1}$, respectivamente (Figura 4).

ISSN 2215-3608 https://doi.org/10.15517/9zb7wj95

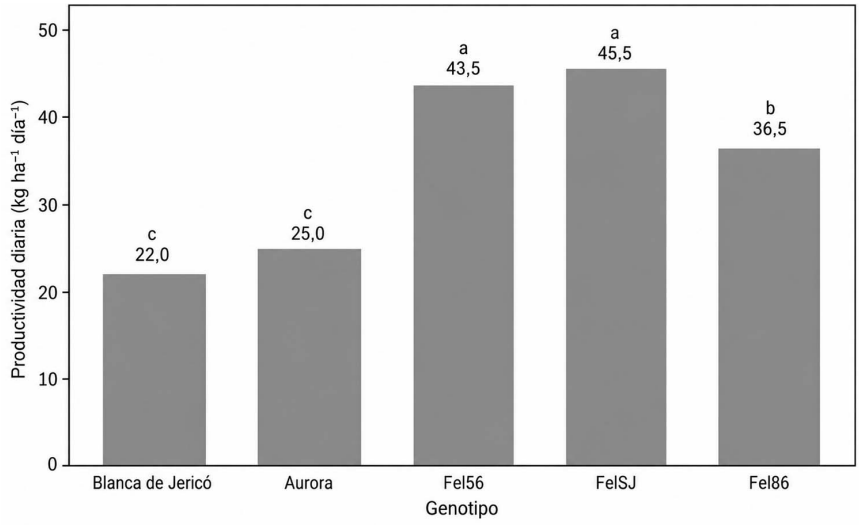

Figura 4. Productividad diaria de genotipos de quinua evaluados bajo la densidad intermedia de siembra (0,70 × 0,10 m) en Silvia, Cauca, Colombia, segundo semestre de 2024.

Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre genotipos según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Figure 4. Daily productivity of quinoa genotypes evaluated under the intermediate sowing density (0.70 × 0.10 m) in Silvia, Cauca, Colombia, during the second half of 2024.

Different letters above the bars indicate significant differences among genotypes according to Tukey's test ($\alpha = 0.05$).

Discusión

La respuesta agronómica de los genotipos sugirió que la densidad de siembra pudo modificar la competencia intraespecífica y, con ello, la expresión de la arquitectura de la planta. En este estudio, el arreglo de mayor distanciamiento (0,80 × 0,50 m) favoreció una mayor altura, longitud de la panoja y diámetro del tallo, lo que coincide con lo reportado por Montes-Rojas et al. (2020), quienes indicaron que la densidad y el método de siembra modificaron el rendimiento y la expresión agronómica de la quinua en el Cauca. De manera similar, Al Jbawi et al. (2022) indicaron que la densidad de plantas influyó en el crecimiento y el rendimiento de la semilla, lo que respalda la importancia del arreglo espacial en la respuesta del cultivo.

La reducción del crecimiento con la siembra a chorrillo podría estar relacionada con una mayor presión competitiva entre plantas y una menor disponibilidad individual de luz, agua y nutrientes. Este comportamiento presenta similitudes con lo señalado por Wang et al. (2022), quienes evaluaron la quinua bajo diferentes densidades de plantación, umbrales de riego y niveles de nitrógeno en el noroeste de China y encontraron que la densidad poblacional modificó el riesgo de volcamiento y el rendimiento. Aunque las condiciones ambientales de ese estudio difirieron de las altoandinas del Cauca, ambos resultados sugieren que el incremento de la densidad poblacional no siempre mejora la eficiencia productiva cuando aumenta la competencia intraespecífica.

El desarrollo de la panoja y del tallo mostró una alta dependencia del arreglo espacial, lo que sugiere que la competencia temprana condicionó la capacidad posterior de asignar asimilados a estructuras reproductivas. Esta respuesta coincide con Castro-Albán et al. (2023), quienes reportaron variabilidad morfoagronómica importante en quinua tipo Chimborazo, asociada con diferencias en arquitectura, desarrollo vegetativo y caracteres productivos. También concuerda con El-Harty et al. (2021) y Hussain et al. (2020), quienes señalaron que la expresión de caracteres morfológicos y productivos en quinua depende del genotipo y de su interacción con el ambiente de evaluación.

El peso de mil granos presentó una respuesta menos dependiente del arreglo espacial que otros caracteres morfoagronómicos. Esta tendencia sugiere que el tamaño del grano estuvo más asociado al componente genético que a la densidad de siembra, tal como lo plantearon García-Parra et al. (2020) al relacionar la respuesta de la quinua con características agroclimáticas y genotípicas. Asimismo, Manjarres-Hernández et al. (2021) indicaron que los componentes del rendimiento son útiles para seleccionar materiales en programas de mejoramiento, especialmente cuando permiten diferenciar genotipos con mayor potencial productivo.

La mayor expresión vegetativa observada bajo espaciamientos amplios no implicó necesariamente un mayor rendimiento del grano. Este resultado coincide con Montes-Rojas et al. (2020), quienes evidenciaron que el rendimiento de la quinua no depende solo del crecimiento individual de la planta, sino también de la densidad, el método de siembra y la eficiencia en el uso del área. En este estudio, el arreglo 0,70 × 0,10 m permitió un mejor balance entre la densidad poblacional, la competencia moderada y la producción por unidad de superficie, principalmente en las familias FelSJ y Fel56.

La interacción densidad × genotipo indicó que los materiales evaluados no respondieron de forma uniforme al arreglo espacial. Esta respuesta coincide con lo reportado por Anchico-Jojoa et al. (2023), quienes resaltaron la importancia de la interacción genotipo × ambiente en la caracterización agronómica de la quinua en ambientes contrastantes de Brasil y Colombia. Además, los resultados complementan los hallazgos de Pizo-Ossa et al. (2024, 2025), quienes evidenciaron variabilidad fenológica, morfológica y productiva entre genotipos de quinua, lo que respalda la necesidad de ajustar las recomendaciones de manejo según el material genético.

El comportamiento fenológico confirmó que la densidad de siembra también influyó en la duración del ciclo del cultivo. Los ciclos más prolongados observados en Blanca de Jericó y Aurora con el arreglo 0,80 × 0,50 m coinciden con lo reportado por Montes-Rojas et al. (2018), quienes describieron diferencias en la duración de las etapas fenológicas entre ecotipos de quinua evaluados en Puracé, Cauca. De igual forma, Pizo-Ossa et al. (2024) reportaron diferencias fenológicas entre genotipos de quinua, lo que permite interpretar que la duración del ciclo depende tanto del genotipo como de las condiciones de manejo.

La aceleración fenológica observada con la siembra a chorrillo puede explicarse por una mayor competencia intraespecífica durante las fases intermedias y reproductivas del cultivo. Este resultado es comparable con lo reportado por Urdanegui et al. (2021), quienes identificaron diferencias agromorfológicas y de rendimiento entre genotipos de quinua en Perú, asociadas con la respuesta diferencial de los materiales evaluados. También concuerda con Estrada Zúñiga et al. (2022), quienes observaron variabilidad morfoagronómica en accesiones de quinua, lo que confirma que la respuesta fenológica y productiva depende de la interacción entre genotipo, ambiente y manejo.

En las etapas tempranas de dos, cuatro y seis hojas verdaderas, la interacción entre densidad y genotipo no fue significativa, lo que indicó que la respuesta de los genotipos a los arreglos de siembra fue similar durante el establecimiento inicial. Aunque la densidad de siembra y el genotipo presentaron efectos significativos como factores principales, la ausencia de interacción en estas etapas sugiere que sus efectos se expresaron de manera relativamente independiente. Este comportamiento es consistente con la importancia de las condiciones ambientales durante las fases iniciales de desarrollo de la quinua, particularmente frente a factores de estrés abiótico.

La productividad diaria permitió integrar el rendimiento con la duración del ciclo, lo que aportó una lectura más funcional de la eficiencia agronómica. Los materiales con ciclos más prolongados no necesariamente presentaron mayor eficiencia temporal, debido a que una mayor duración del ciclo puede incrementar los costos fisiológicos

de mantenimiento sin asegurar una mayor acumulación de grano. Este enfoque coincide con lo señalado por Foronda Limachi (2022), quien evaluó variables fenológicas, morfológicas y nutricionales en progenies de quinua, y respalda la importancia de valorar no solo cuánto produce un genotipo, sino también qué tan eficiente es durante su ciclo de desarrollo.

Los resultados de este estudio aportan evidencia agronómica para orientar el manejo de la densidad de siembra en genotipos de quinua bajo condiciones altoandinas de Silvia, Cauca. Sin embargo, debido a la influencia del ambiente sobre la expresión fenológica y productiva del cultivo, es necesario validar estos arreglos espaciales en otros ciclos, localidades y condiciones agroecológicas. Esta validación permitiría fortalecer la recomendación técnica y ampliar su aplicabilidad a diferentes sistemas de producción de quinua en la región andina.

Conclusiones

La densidad de siembra y el genotipo influyeron sobre la fenología, la arquitectura de la planta y el rendimiento del grano de la quinua bajo condiciones altoandinas de Silvia, Cauca. La interacción densidad × genotipo fue relevante principalmente desde la ramificación del tallo y durante las etapas reproductivas y de madurez, mientras que en las fases tempranas de dos, cuatro y seis hojas verdaderas no se detectó una respuesta diferencial entre genotipos frente a los arreglos de siembra. Estos resultados evidencian que la respuesta al arreglo espacial depende tanto de la etapa de desarrollo como del material genético evaluado.

Las familias mejoradas mostraron una respuesta favorable al arreglo intermedio de 0,70 × 0,10 m, particularmente FelSJ y Fel56, que alcanzaron los mayores rendimientos y productividad diaria. En contraste, el arreglo más amplio favoreció una mayor expresión vegetativa y ciclos fenológicos más prolongados. Los hallazgos aportan criterios para ajustar el manejo de la densidad de siembra según el genotipo y orientar la selección de materiales de quinua para ambientes altoandinos; no obstante, su aplicación deberá validarse en otros ciclos, localidades y condiciones de producción.

Agradecimientos

El autor agradece a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) por el apoyo brindado durante el establecimiento y seguimiento del ensayo en campo. También expresa su agradecimiento a la Gobernación del Cauca por el respaldo otorgado mediante el proyecto financiado con recursos del Sistema General de Regalías (SGR) del departamento del Cauca. Asimismo, agradece a la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, y a la Universidad del Cauca por el acceso a sus instalaciones y el apoyo técnico para el procesamiento y análisis de muestras. Se extiende un reconocimiento especial al ingeniero agrónomo Benjamín Sañudo Sotelo por su contribución mediante el suministro del material genético de quinua utilizado en esta investigación.

Conflicto de intereses

El autor declara que no existen conflictos de intereses relacionados con este estudio.

Referencias

Al Jbawi, E., Othman, M., Al Hunnish, T., & Abbas, F. (2022). The effect of plant density on growth and seed yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the middle region of Syria. *International Journal of Phytology Research*, *2*(1), 19-24. https://www.dzarc.com/phytology/article/view/58

Anchico-Jojoa, W., Peixoto, J. R., & De Oliveira Júnior, A. A. (2023). Agronomic characterization and interaction of genotype by environment of quinoa under conditions of Brazil and Colombia. *Horticultura Brasileira*, *41*, Artículo e2629. https://doi.org/10.1590/S0102-0536-2023-E2629

Antognoni, F., Potente, G., Biondi, S., Mandrioli, R., Marincich, L., & Ruiz, K. B. (2021). Free and conjugated phenolic profiles and antioxidant activity in quinoa seeds and their relationship with genotype and environment. *Plants*, *10*(6), Artículo 1046. https://doi.org/10.3390/plants10061046

Bazile, D., Jacobsen, S.-E., & Verniau, A. (2016). The global expansion of quinoa: trends and limits. *Frontiers in Plant Science*, *7*, Artículo 622. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00622

Castro-Albán, H. A., Castro-Gómez, R. del P., & Alvarado-Capó, Y. (2023). Variabilidad morfoagronómica de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) nativa tipo Chimborazo en Ecuador. *Agronomía Mesoamericana*, *34*(3), Artículo 53229. https://doi.org/10.15517/am.2023.53229

Delgado, H., Tapia, C., Manjarres-Hernández, E. H., Borja, E., Naranjo, E., & Martín, J. P. (2024). Phenotypic diversity of quinoa landraces cultivated in the Ecuadorian Andean region: in situ conservation and detection of promising accessions for breeding programs. *Agriculture*, *14*(3), Artículo 336. https://doi.org/10.3390/agriculture14030336

El-Harty, E. H., Ghazy, A., Alateeq, T. K., Al-Faifi, S. A., Khan, M. A., Afzal, M., Alghamdi, S. S., & Migdadi, H. M. (2021). Morphological and molecular characterization of quinoa genotypes. *Agriculture*, *11*(4), Artículo 286. https://doi.org/10.3390/agriculture11040286

Estrada Zúñiga, R., Bobadilla, L. G., Neyra Valdez, E., Manotupa Tupa, M. B., Álvarez Caceres, A., & Céspedes Florez, E. (2022). Evaluación morfoagronómica de 100 accesiones de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) por su respuesta a mildiu (*Peronospora variabilis* Gäum.), rendimiento y contenido de saponina en Cusco, Perú. *Avances en Investigación Agropecuaria*, *26*(1), 47-61. https://doi.org/10.53897/RevAIA.22.26.04

Estrada-Zúñiga, R., Apaza-Mamani, V., Pérez-Ávila, A. A., Altamirano-Pérez, A. M., Neyra-Valdez, E., & Bobadilla, L. G. (2022). Comportamiento agronómico de 81 genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el Perú. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *9*(1), Artículo e3134. https://doi.org/10.19136/era.a9n1.3134

Foronda Limachi, E. M. (2022). *Evaluación fenológica, morfológica y nutricional de cuatro progenies de quinua (Chenopodium quinoa* Willd.) *generación M3 bajo condiciones semicontroladas* [Tesis doctoral, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional UMSA. https://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/29078

García-Parra, M., Zurita-Silva, A., Stechauner-Rohringer, R., Roa-Acosta, D., & Jacobsen, S. E. (2020). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and its relationship with agroclimatic characteristics: a Colombian perspective. *Chilean Journal of Agricultural Research*, *80*(2), 290-302. https://doi.org/10.4067/S0718-58392020000200290

Hussain, M. I., Muscolo, A., Ahmed, M., Asghar, M. A., & Al-Dakheel, A. J. (2020). Agro-morphological, yield and quality traits and interrelationship with yield stability in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes under saline marginal environment. *Plants*, *9*(12), Artículo 1763. https://doi.org/10.3390/plants9121763

Laouedj, H., Kherraz, K., Touati, S., Messoudi, M., Ghemam Amara, D., & Kadour, A. (2023). Effect of planting density on *Chenopodium quinoa* Willd. growth and yield in desert areas. *NeuroQuantology*, *21*(1), 1002-1011. https://doi.org/10.48047/nq.2023.21.01.NQ20077

Madrid, D., Salgado, E., Verdugo, G., Olguín, P., Bilalis, D., & Fuentes, F. (2018). Morphological traits defining breeding criteria for coastal quinoa in Chile. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *46*(1), 190-196. https://doi.org/10.15835/nbha46110788

Manjarres-Hernández, E. H., Morillo-Coronado, A. C., Ojeda-Pérez, Z. Z., Cárdenas-Chaparro, A., & Arias-Moreno, D. M. (2021). Characterization of the yield components and selection of materials for breeding programs of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Euphytica*, *217*(6), Artículo 101. https://doi.org/10.1007/s10681-021-02837-5

Montes-Rojas, C., Burbano-Catuche, G. A., & Muñoz-Certuche, E. F. (2020). Evaluación del rendimiento de quinua bajo diferentes densidades, fertilización y métodos de siembra en Cauca. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *18*(1), 46-55. https://doi.org/10.18684/bsaa.v18n1.1410

Montes-Rojas, C., Burbano-Catuche, G. A., Muñoz-Certuche, E. F., & Calderón-Yonda, Y. (2018). Descripción del ciclo fenológico de cuatro ecotipos de (*Chenopodium quinua* Willd.), en Puracé – Cauca, Colombia. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *16*(2), 26-37. https://doi.org/10.18684/bsaa.v16n2.1163

Morillo-Coronado, A. C., Manjarres-Hernández, E. H., & Pedreros-Benavides, M. C. (2022). Genetic diversity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) from Cundinamarca, Colombia. *Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization*, *20*(3), 223-229. https://doi.org/10.1017/S1479262123000060

Pizo-Ossa, M. A., López-Hoyos, J. L., Vásquez-Castro, D. C., Aguilera-Arango, G. A., Morillo-Coronado, A. C., & Morillo-Coronado, Y. (2025). Morpho-agronomic characterization and yield performance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes. *Agronomía Colombiana, 43*(2), Artículo e117774. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v43n2.117774

Pizo-Ossa, M. A., Montes-Rojas, C., Aguilera-Arango, G. A., Ramos-Villafañe, Y. P., López-Hoyos, J. L., & Morillo-Coronado, Y. (2024). Evaluation of the phenological cycle and morphological characterization of quinoa genotypes (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *27*(2), Artículo 075. https://doi.org/10.56369/tsaes.5397

Urdanegui, P., Pérez-Ávila, Á., Estrada-Zúñiga, R., Neyra, E., Mujica, Á., & Corredor, F.-A. (2021). Rendimiento y evaluación agromorfológica de genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en Huancayo, Perú. *Agroindustrial Science*, *11*(1), 63-71. https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2021.01.08

Wang, N., Wang, F., Shock, C. C., Gao, L., Meng, C., Huang, Z., & Zhao, J. (2022). Evaluating quinoa lodging risk and yield under different irrigation thresholds, nitrogen rates and planting densities in north-western China. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, *9*(4), 614-626. https://doi.org/10.15302/J-FASE-2021430