



Fertilización foliar del frijol con boro y magnesio contra el estrés por altas temperaturas naturales

Foliar fertilization of beans with boron and magnesium to prevent high temperature stress

Alejandro Antonio Prado-García^{1,2}, Gabriel Iturriaga de-la-Fuente², César Leobardo Aguirre-Mancilla², Jorge Alberto Acosta-Gallegos^{1*}

RESUMEN

El estrés por alta temperatura disminuye el rendimiento y calidad del frijol. El objetivo del presente trabajo fue determinar el rendimiento de cuatro variedades de frijol, dos de *Phaseolus vulgaris* (Granada y Rarámuri) y dos de *Phaseolus acutifolius* (TARS-Tep 23 y Alubia Choix) producidas bajo riego, con la aplicación de boro (B) y magnesio (Mg) en condiciones de campo con temperaturas naturales altas. Se administraron en tres ocasiones (una en pre-floración y dos durante la floración) cuatro tratamientos de fertilización foliar: B, Mg, B + Mg y un testigo sin fertilizar. El ensayo se realizó en marzo de 2020 y 2021. Se cuantificó la biomasa, peso de 100 semillas, rendimiento e índice de cosecha. Se determinó la germinación y vigor de la semilla cosechada en cada tratamiento y variedad. En promedio, *P. vulgaris* resultó superior ($P \leq 0.05$) a *P. acutifolius* en peso de 100 semillas y rendimiento. La variedad Rarámuri mostró un mayor rendimiento, biomasa y peso de 100 semillas. Los tratamientos de fertilización superaron al testigo, con incremento promedio de 0.4 g en peso de 100 semillas y 512 kg/ha en rendimiento. La aplicación foliar de Mg aumentó el rendimiento y el peso de 100 semillas en ambas especies y variedades evaluadas.

PALABRAS CLAVE: *Phaseolus vulgaris* L., *Phaseolus acutifolius* A. Gray, estrés abiótico, micronutrientes, rendimiento.

ABSTRACT

High temperature stress lowers bean yield and quality. This work aimed to determine the yield response of four bean cultivars, two of *P. vulgaris* (Granada and Rarámuri) and two of *P. acutifolius* (TARS-Tep 23 and Alubia Choix) grown under irrigation, to the application of Boron and Magnesium under field conditions with naturally high temperatures. Four foliar fertilization treatments were administered on three occasions (one in pre- and two during flowering) B, Mg, B + Mg and a control group without fertilization. The trial was carried out in 2020 and 2021. Aerial biomass, weight of 100 seeds, yield and the harvest index were quantified. Germination and vigor of harvested seeds were determined for each treatment and cultivar. On average, *P. vulgaris* was superior ($P \leq 0.05$) to *P. acutifolius* in 100-seed weight and seed yield. The Rarámuri cultivar showed greater yield, biomass, and 100-seed weight. The foliar fertilization treatments surpassed the control group, with an average increase of 0.4 g in 100-seed weight and 512 kg/ha in yield. Foliar Mg application increased yield and 100-seed weight in both species and varieties evaluated.

KEYWORDS: *Phaseolus vulgaris* L., *Phaseolus acutifolius* A. Gray, abiotic stress, micronutrients, yield.

*Correspondencia: acosta.jorge@inifap.gob.mx/Fecha de recepción: 10 de abril de 2025/Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2025/Fecha de publicación: 31 de octubre de 2025.

¹Centro Nacional de Investigación disciplinaria (CIR Centro), Campo Experimental Bajío, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIFAP) Agrícolas y Pecuarias, km. 6.5 carretera Celaya-San Miguel de Allende, Celaya, Guanajuato, México, C. P. 38110. ²Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Roque (TecNM-IT Roque), Celaya, Guanajuato, México, C. P. 38110.

INTRODUCCIÓN

El frijol se cataloga como un cultivar extremadamente sensible al estrés por calor, principalmente cuando este ocurre durante la etapa reproductiva inicial (Porch y Jahn, 2001). El efecto simultáneo de altas temperaturas y déficit de humedad provocan el aborto de flores y vainas pequeñas, lo que afecta directamente el rendimiento (Porch y Jahn, 2001; Omae y col., 2012). A nivel global, se estima que el cambio climático incrementará la presencia de sequía y de altas temperaturas, lo que podría dañar del 60 % al 73 % del área actual de siembra del frijol, ocasionando pérdidas en la producción del 10 % al 100 % (Beebe y col., 2008).

En El Bajío, el frijol se produce en dos modalidades de siembra, riego y temporal, siendo más importantes las primeras, por su alta productividad. Sin embargo, la superficie bajo riego destinada al cultivo de frijol ha disminuido en los últimos años, debido a un bajo rendimiento, que podría asociarse a la presencia de temperaturas superiores a 32 °C, que coinciden con el inicio de la etapa reproductiva (Anaya-López y col., 2022). Dichas temperaturas dañan el polen y causan la caída de vainas y un menor número de semillas en estas (Porch y Jahn, 2001). Anaya-López y col. (2022) determinaron, a campo abierto, el efecto de la temperatura alta sobre el rendimiento e índice de cosecha (IC) en germoplasma mejorado de frijol de los tipos Pinto y Flor de Mayo. En su estudio, los materiales con bajo IC registraron producción alta de biomasa y un elevado número de vainas, pero con una o dos semillas, por lo que generaron un rendimiento inferior. Por el contrario, los materiales con rendimiento alto mostraron un número elevado de granos por unidad de área, como resultado de la formación de más vainas con mayor número de semillas. Omae y col. (2012) obtuvieron resultados similares y concluyeron que los materiales de frijol tolerantes al calor mostraron alta capacidad para distribuir fotoasimilados a las ramas, lo que se tradujo en alta producción de vainas y semillas.

Cakmak y Yazici (2010) señalaron que, la clorosis en las hojas ocurre bajo condiciones de estrés abiótico en combinación con una deficiencia nutrimental de potasio (K) y Mg. Indicaron que las plantas con deficiencia de Mg fueron más susceptibles al estrés por altas temperaturas, aumentando la clorosis, ya que este elemento constituye 2.7 % de la clorofila y es fundamental en la fotosíntesis, además, promueve el crecimiento radicular y el transporte de fotoasimilados en la planta. Adicionalmente, el Mg actúa como cofactor en más de 300 reacciones enzimáticas críticas bajo estrés térmico, incluyendo la síntesis de adenosín trifosfato (ATP) y la activación de la ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa (RuBisCO), enzimas todas, que se ven severamente comprometidas por las altas temperaturas (Baloch y col., 2022). El boro (B) es otro elemento involucrado en múltiples funciones como la síntesis y estructura de la pared celular, lignificación, metabolismo y transporte de carbohidratos e integridad de la membrana plasmática, entre otros procesos que se ven afectados por las altas temperaturas (Kirkby y Rómheld, 2008). Se estima que cerca del 90 % del B de la planta se encuentra en las paredes celulares, por lo cual puede considerarse como un elemento fundamental para contrarrestar los efectos provocados por las altas temperaturas (Ahmad y col., 2009). La deficiencia de dicho elemento afecta la formación del tubo polínico y con ello la formación del fruto, lo que conlleva a bajos rendimientos. Además, el B es fundamental para la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico, procesos extremadamente sensibles a las altas temperaturas y que pueden determinar el éxito reproductivo del cultivo bajo estrés térmico (Behera y col., 2023). Este problema se puede abordar con el uso de variedades tolerantes a altas temperaturas, en combinación con la nutrición vegetal adecuada (Anaya-López y col., 2022). Por otra parte, entre las especies domesticadas del género *Phaseolus*, el frijol Tepari o escomite es mencionado en la literatura como tolerante a altas temperaturas (Rainey y Griffiths, 2005).

El objetivo de este estudio fue determinar el rendimiento y la calidad fisiológica de la semilla de cuatro variedades de frijol, dos de *P. vulgaris* y dos de *P. acutifolius*, en respuesta a la aplicación foliar de B y Mg, en condiciones de altas temperaturas naturales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se realizó bajo condiciones de campo abierto en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ) del (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) (INIFAP), localizado a los 20°34' 47" N, 100°49'22" W y 1 764 msnm. El clima predominante de la zona es BS1hw (W). La temperatura promedio oscila en los 20.6 °C y la precipitación anual promedio es de 597 mm (Mora y col., 2001).

Material vegetal

Se utilizaron cuatro variedades de frijol de dos especies: *P. vulgaris* L. o frijol común, variedades locales de Granada y Rarámuri, y *P. acutifolius* o frijol Tepari, variedades TARS-Tep 23 (Puerto Rico) y Alubia Choix, Sinaloa.

Diseño experimental

Estudio agronómico

Para las evaluaciones de campo se utilizó un diseño de bloques completos al azar con arreglo de parcelas divididas y tres repeticiones en cada ciclo de cultivo. Este diseño se empleó para controlar el error experimental inherente a las condiciones heterogéneas de campo. La parcela grande estuvo constituida por las cuatro variedades y la subparcela por los cuatro tratamientos de fertilización foliar. Los tratamientos de fertilización fueron YaraVita Boro® al 11 %, 0.5 L/ha (por unidad experimental se aplicaron 0.57 mL/1 L de agua); Yara Vita Magnesio® al 20 %, 4.0 L/ha (por unidad experimental se administraron 4.56 mL/1 L de agua); B + Mg (por unidad experimental se aplicaron 0.57 mL de B + 4.56 mL de Mg/1 L de agua) y un testigo sin fertilizante.

Aplicación de tratamientos foliares

Los tratamientos de fertilización foliar se administraron en tres ocasiones durante el ciclo

de cultivo: la primera se realizó en la etapa de prefloración (aproximadamente a los 35 DDS después de la siembra, DDS), y las dos aplicaciones restantes durante la floración (a los 45 DDS y 55 DDS, aproximadamente). Los tratamientos se llevaron a cabo mediante aspersión foliar, con bomba de mochila (Urrea, FUMU20, El Salto, Jalisco, México), aplicando un volumen de 300 L/ha en las primeras horas de la mañana (7: 00 h a 9: 00 h), para minimizar la evaporación y maximizar la absorción foliar. Se utilizó agua como vehículo y se añadió surfactante no iónico (0.1 % v/v) para mejorar la adherencia y penetración de los micronutrientes en las hojas.

Manejo agronómico

La siembra se realizó a tierra venida, después de un riego de preparación, con una lámina de 30 mm. Las fechas de siembra fueron el 16 de marzo de 2020 y 13 de marzo de 2021. El manejo agronómico fue el mismo en ambos ciclos. El suelo se fertilizó con la dosis 80-60-40 de N-P-K. Se establecieron 12 plantas/m/L en surcos a 76 cm de distancia, lo que representa una densidad de población de aproximadamente 157 895 plantas/ha. La parcela de cada unidad experimental estuvo constituida por 3 surcos de 5 m de longitud. Durante la etapa vegetativa se dieron 2 cultivos mecánicos para controlar maleza. Se llevó a cabo un segundo riego rodado con una lámina de 30 mm a los 30 d después de la siembra (DDS). A los 65 DDS se colocó cintilla para riego por goteo con un gasto de 1 L/h. A partir de ese momento se realizaron 3 riegos semanales, aplicando en cada ocasión una lámina de 15 mm desde los 65 DDS hasta los 95 DDS (195 mm). La lámina total de riego suministrada durante el ciclo de cultivo fue de aproximadamente 255 mm.

Variables evaluadas

Las variables se evaluaron en parcelas útiles (a las cuales se eliminó el efecto de borde para asegurar que todas las plantas tuvieron competencia uniforme con sus vecinas) de un surco central de 5 m/L. Los días a floración se registraron cuando el 50 % de las

plantas presentó al menos una flor abierta. La altura de planta se midió desde la base del tallo hasta el ápice en 5 plantas tomadas al azar dentro de la parcela útil. El número de vainas por planta y el número de semillas por vaina se determinaron a partir de 5 plantas individuales tomadas al azar dentro de la parcela útil.

El rendimiento de semilla (kg/ha) se obtuvo cosechando la parcela útil completa y ajustando la humedad al 14 % mediante la fórmula:

$$\text{Rendimiento ajustado} = [\text{Peso húmedo} \times (100 - \text{humedad inicial})] \div (100 - 14)$$

El peso de 100 semillas (g) se determinó contando y pesando 100 semillas tomadas al azar de cada parcela.

Índice de cosecha (IC)

Se obtuvo un IC modificado, mediante la recolección del material biológico presente en 0.5 m/L antes de la senescencia de las hojas, procurando recolectar en bolsas todas las hojas caídas previo al muestreo. En el cálculo de biomasa aérea se incluyó el peso de tallos, vainas (sin semillas) y hojas. En el caso de las semillas se incluyó solo el peso de las semillas presentes en la muestra recolectada, sin las vainas. El IC se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{IC} = [(\text{Peso de semilla} / \text{Peso de biomasa aérea total}) \times 100]$$

Durante los dos ciclos del cultivo de frijol de riego, se registró la temperatura y precipitación pluvial cada tercer día, en una estación meteorológica automática (Vantage Pro2, Davis Instruments, Hayward, CA, EE. UU.), ubicada a 300 m del sitio experimental.

Caracterización de las semillas

Las semillas obtenidas de cada tratamiento de campo fueron evaluadas en el laboratorio para determinar las variables de calidad fisiológica del porcentaje de germinación estándar a

los 8 d, emergencia de radícula a los 4 d (vigor), peso fresco y seco de plántula, y número de semillas muertas y anormales. Las pruebas se realizaron bajo condiciones controladas de temperatura ($25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa ($65\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$) utilizando 50 semillas por tratamiento con cuatro repeticiones.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de cada ciclo individual se realizó mediante un diseño de bloques completos al azar con arreglo de parcelas divididas, donde la parcela principal correspondió a las variedades y la subparcela a los tratamientos de fertilización foliar, incluyendo sus interacciones. En el análisis combinado de ambos ciclos (2020 y 2021) se empleó un diseño factorial generalizado con los factores año, variedad, fertilización foliar y sus interacciones.

Adicionalmente, se llevaron a cabo análisis multivariados (Componentes Principales y Cluster Jerárquico Aglomerativo) utilizando los promedios de los tres factores principales. Todos los análisis estadísticos se realizaron mediante el paquete estadístico SAS v9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, EUA) y Genotype-Environment Analysis in R (GEA-R) v4.1 (Desarrollador: Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) (Texcoco, México); los análisis multivariados complementarios, gráficos y cálculos se elaboraron en Microsoft Excel 2016 versión 16.0 (Microsoft Office, Redmond, WA, EUA).

Análisis de correlación

Las variables agronómicas se evaluaron independientemente del tratamiento de fertilización aplicado. Para la interpretación de las correlaciones se utilizó la escala de Cohen (1988): débil ($r = 0.10$ a 0.29), moderada ($r = 0.30$ a 0.49), fuerte ($r = 0.50$ a 0.70) y muy fuerte ($r > 0.70$).

Análisis de semilla por efecto de genotipo y tratamiento de fertilización foliar

Para las evaluaciones de germinación y vigor de la semilla, se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial, ya que

las condiciones controladas de laboratorio no requieren bloqueo para el control del error experimental. Los factores del arreglo factorial fueron las cuatro variedades (genotipos) y los cuatro tratamientos de fertilización foliar aplicados por triplicado durante la producción de la semilla en campo.

Se utilizaron semillas provenientes de plantas del ensayo de campo donde se evaluaron los cuatro genotipos bajo diferentes tratamientos de fertilización foliar (B, Mg, B + Mg y testigo), para analizarlas por efecto de genotipo y tratamiento de fertilización foliar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperaturas máximas y mínimas en el ciclo

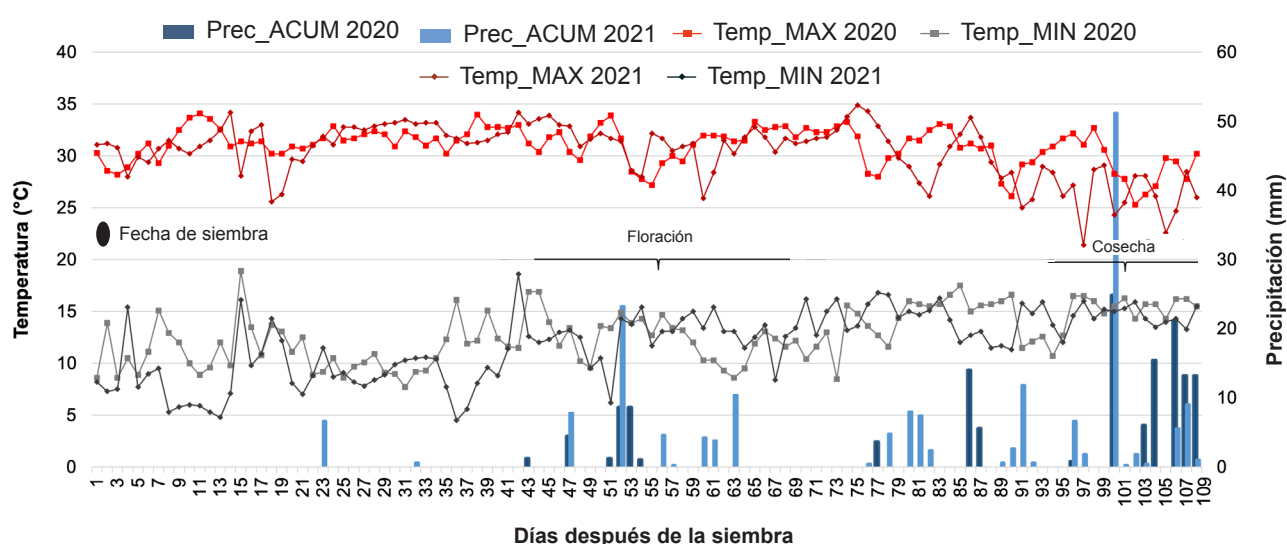
Las temperaturas máximas reportadas en la zona de cultivo (Figura 1; Tabla 1), durante la etapa crítica de floración (21 d) de ambos ciclos (2020 y 2021), oscilaron entre 21.4 °C y 34.9 °C, mientras que las mínimas variaron entre ≈ 4.5 °C y ≈ 18.9 °C. Se registraron 17 d de temperaturas máximas consistentemente ≥ 30 °C en los 2 años. Aunque no se calculó la duración en horas de estas tem-

peraturas elevadas, estuvieron constantemente presentes, toda vez que en 2020, se registraron hasta 7 d consecutivos de temperatura ≥ 30 °C; mientras que en 2021, se reportaron hasta 5 d consecutivos con estas mismas condiciones climáticas, la cuales fueron críticas para los cultivos. La exposición a temperaturas entre 28 °C y 32 °C durante la etapa reproductiva disminuye el número de vainas y semillas, afectando el tamaño de estas últimas, ya que la temperatura es uno de los parámetros ambientales con mayor influencia en el desarrollo del frijol durante todo su ciclo de cultivo (Barrios-Gómez y López-Castañeda, 2009).

Efecto del año

Durante el periodo de siembra 2020, el 76.1 % de los 108 DDS presentaron temperaturas ≥ 30 °C, en tanto que, durante el periodo 2021, el 64.8 % de los DDS registraron ese comportamiento (Figura 1; Tabla 1).

En 2020, la etapa vegetativa tuvo mayor duración (48 d a floración) que en 2021 (44 d a floración) (Tabla 1). Esto pudo haber sido in-



■ Figura 1. Temperaturas máximas y mínimas y precipitación pluvial durante el ciclo del cultivo de frijol de riego en el Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, en los años 2020 y 2021.

Figure 1. Maximum and minimum temperatures and rainfall during the irrigated bean crop cycle at Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato in 2020 and 2021.

■ Tabla 1. Valores promedio de temperatura y humedad en ambos ciclos de cultivo.

Table 1. Average values of temperature and moisture in both crop cycles.

Periodo	2020			2021		
	Días (n)	Temperatura Máxima (°C)	Precipitación (mm)	Días (n)	Temperatura Máxima (°C)	Precipitación (mm)
Promedio del periodo considerado						
Días a floración	48	31.4 ± 1.3 ^a	5.6	44	30.8 ± 2.4 ^a	7.2
Días de floración	21	31.4 ± 1.8 ^a	19.4	21	31.4 ± 2.1 ^a	54.2
Días a cosecha	40	30.1 ± 2.1 ^a	117.8	43	27.8 ± 2.8 ^b	116.2
Días totales	109	31.0 ± 1.8 ^a	142.8	108	29.8 ± 2.9 ^a	177.6
Promedio de los días con temperaturas ≥ 30 °C en el periodo considerado						
Días a floración	43/48 (89.5 %)	---	---	36/44 (71.4 %)	---	---
Días de floración	15/21 (81.0 %)	---	---	17/21 (81.0 %)	---	---
Días a cosecha	25/40 (62.5 %)	---	---	17/43 (39.5 %)	---	---
Días totales	83/109 (76.1 %)	---	---	70/108 (64.8 %)	---	---

^{a, b} Letras distintas indican diferencia significativa ($P < 0.05$) para un mismo parámetro en diferente año.

fluenciado por las temperaturas mínimas que se presentaron en 2020 (7.7 °C a 18.9 °C) respecto a las de 2021 (4.5 °C a 18.6 °C), aunado a la menor precipitación (5.6 mm vs 15.0 mm) así como a la ausencia de precipitaciones significativas durante el establecimiento del cultivo (Figura 1).

La altura de planta no varió por efecto del ciclo de siembra, pero la biomasa fue significativamente mayor ($P \leq 0.05$) en 2020 (Tabla 2). Dicha acumulación de biomasa podría deberse a que, las condiciones climáticas iniciales de 2020 (89.5 % de temperaturas ≥ 30) (Tabla 1) pudieron haber permitido un desarrollo radicular más profundo y robusto, usualmente asociado con mayor producción vegetativa (Tapia y col., 2022) y explicaría el mayor número de vainas por planta ($P \leq 0.05$) (Tabla 2). Esta característica en particular estuvo asociada al rendimiento superior obtenido en 2020, y con ello, el mayor IC (ambos

con $P \leq 0.05$ respecto al 2021), ya que el número de semillas por vaina y el peso de 100 semillas no mostraron diferencia.

Efecto por variedad

El peso de 100 semillas reportó diferencia ($P \leq 0.05$) entre los cuatro tratamientos. En *P. acutifolius* varió de 11.6 g a 13.0 g, en tanto que *P. vulgaris* registró entre 26.1 g y 32.8 g (Tabla 3). Se ha reportado que las plantas y semillas de *P. acutifolius* son intrínsecamente de menor tamaño y peso en comparación con las de *P. vulgaris*, pero también que estas variedades presentan mayor tolerancia a estrés hídrico y térmico (Rainey y Griffiths, 2005). Si bien, la comparación entre especies diferentes tiene limitaciones, es importante su análisis para evaluar alternativas de cultivo, bajo las condiciones locales del estudio. Asociado a esta diferencia genotípica, el potencial de rendimiento entre ambas especies fue diferente ($P \leq 0.05$), resultando *P. vulgaris*

■ **Tabla 2. Características agronómicas promedio de los cuatro genotipos de frijol en cada uno de los ciclos de cultivo de riego (2020 y 2021).**

Table 2. Average agronomic characteristics of the four bean genotypes during each of the irrigated growing seasons (2020 and 2021).

Parámetro	2020	2021
Días a floración	48.1 ± 3.2 ^a	43.7 ± 2.2 ^b
Altura de planta (cm)	24.9 ± 4.6 ^a	25.4 ± 4.2 ^a
Número de vainas por planta	34.3 ± 4.1 ^a	21.6 ± 4.3 ^b
Número de semillas por vaina	5.3 ± 0.6 ^a	5.0 ± 0.7 ^a
Biomasa (kg/ha)	6 313.9 ± 1 089.5 ^a	4 055.6 ± 1 076.8 ^b
Peso de 100 semillas (g)	20.8 ± 9.5 ^a	21.0 ± 9.1 ^a
Rendimiento de grano (kg/ha)	2 569.9 ± 441.2 ^a	1 101.3 ± 617.4 ^b
Índice de cosecha (%)	43.5 ± 9.8 ^a	27.2 ± 16.1 ^b

Se muestran valores promedio ± desviación estándar de tres tratamientos de fertilización foliar y un testigo sin fertilizar.

^{a,b}Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$) entre años (columnas) para un mismo parámetro evaluado (hileras).

■ **Tabla 3. Características agronómicas promedio de ambos ciclos de cultivo de riego (2020 y 2021) para cada genotipo de frijol.**

Table 3. Average agronomic characteristics across both irrigated growing seasons (2020 and 2021) for each bean genotype.

Parámetro	<i>P. acutifolius</i>		<i>P. vulgaris</i>	
	Alubia Choix	TARS-Tep 23	Granada	Rarámuri
Días a floración	42.1 ± 2.8 ^b	46.7 ± 2.9 ^{ab}	46.7 ± 4.0 ^{ab}	48.3 ± 2.9 ^a
Altura de planta (cm)	21.0 ± 1.9 ^c	21.4 ± 0.7 ^c	26.4 ± 1.4 ^b	31.9 ± 1.0 ^a
Número de vainas por planta	23.5 ± 9.5 ^b	27.7 ± 8.7 ^a	29.9 ± 5.8 ^a	30.5 ± 6.4 ^a
Número de semillas por vaina	4.8 ± 0.7 ^a	4.9 ± 0.9 ^a	5.4 ± 0.4 ^a	5.5 ± 0.6 ^a
Biomasa (kg/ha)	4 591.2 ± 1 809.1 ^b	5 835.1 ± 1 616.2 ^a	4 463.2 ± 1 992.8 ^b	5 849.5 ± 1 481.3 ^a
Peso de 100 semillas (g)	11.6 ± 0.7 ^d	13.0 ± 0.5 ^c	26.1 ± 0.7 ^b	32.8 ± 0.8 ^a
Rendimiento de grano (kg/ha)	1 657.7 ± 986.8 ^b	1 504.7 ± 841.2 ^b	1 972.8 ± 734.1 ^{ab}	2 207.5 ± 659.9 ^a
Índice de cosecha (%)	36.1 ± 17.8 ^c	25.8 ± 10.2 ^d	42.2 ± 13.2 ^a	37.7 ± 12.4 ^b

Se muestran valores promedio ± desviación estándar de tres tratamientos de fertilización foliar y un testigo sin fertilizar, de cada genotipo de ambos ciclos de cultivo. ^{a,b}Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$) entre genotipos (columnas) para un mismo parámetro evaluado (hileras).

superior a *P. acutifolius* (Tabla 3). Las variedades de *P. vulgaris* (Granada y Rarámuri) registraron rendimientos entre 1 972.8 kg/ha y 2 207.5 kg/ha, mientras que los Teparies (TARS-Tep 23 y Alubia Choix) reportaron rendimientos entre 1 504.7 kg/ha y 1 657.7 kg/ha,

representando aproximadamente 65 % a 75 % del rendimiento del frijol común. Estas diferencias son congruentes con reportes previos que indican menor potencial productivo pero mayor tolerancia al estrés en *P. acutifolius* (Rainey y Griffiths, 2005), el cual mantuvo un

rendimiento relativamente estable (diferencia de solo 153 kg/ha entre variedades) comparado con la mayor variabilidad en *P. vulgaris* (diferencia de 235 kg/ha entre variedades), lo que podría indicar mayor consistencia bajo estrés térmico (Tabla 3).

Entre los Teparies, Alubia Choix presentó mayor IC (36.1 % vs 25.8 %) ($P \leq 0.05$) que TARS-Tep 23 (Tabla 3), característica probablemente asociada a una mejor resistencia al estrés térmico tardío. Entre las variedades de *P. vulgaris*, Rarámuri mostró superioridad ($P \leq 0.05$) en altura de planta (31.9 cm vs 26.4 cm), biomasa (5 849 kg/ha vs 4 463 kg/ha) y peso de 100 semillas (32.8 g vs 26.1 g), respecto a la variedad Granada, pero un menor IC (37.7 % vs 42.2 %) ($P \leq 0.05$) (Tabla 3). Ello se explica por la diferencia en el peso de las semillas entre ambas variedades (un 20.4 % más de peso por semilla), lo que implica que Rarámuri requiere mayor inversión de fotoasimilados por semilla individual, resultando en un menor IC a pesar de su superior rendimiento total. Adicionalmente, Rarámuri presentó el mayor número de vainas por planta (30.5) y semillas por vaina (5.5), característi-

cas directamente relacionadas con su superior rendimiento, aunado a que dicha variedad de material de tipo pinto con alto potencial de rendimiento y respuesta neutral al fotoperiodo (Anaya-López col., 2022), está bien adaptado a la localidad de prueba, donde se desarrolló.

Los resultados obtenidos señalan las diferencias en las características fisiológicas y morfológicas de las plantas que son conducentes a la obtención de altos rendimientos entre el frijol Tepari y el frijol común bajo condiciones de estrés ambiental.

Tratamiento de nutrición foliar (B y Mg)

Los tratamientos con fertilización foliar, aplicando micronutrientes superaron al testigo, con un incremento promedio de 0.4 g en peso de 100 semillas y de 512 kg/ha en rendimiento (Tabla 4).

El incremento de rendimiento varió de 40.3 %, 34.7 % y 30.8 % para Mg, B y B + Mg, respectivamente. La aplicación de fertilización foliar mejoró consistentemente el IC en todos los genotipos, siendo este el parámetro más sensi-

■ **Tabla 4. Efecto de los tratamientos de fertilización en las características agronómicas globales de los cuatro genotipos de frijol.**

Table 4. Effect of fertilization treatments on the overall agronomic characteristics of the four bean genotypes.

Parámetro	Testigo	B	Mg	B + Mg
Días a floración	45.4 ± 3.9 ^a	46.5 ± 4.1 ^a	46.1 ± 4.1 ^a	45.9 ± 3.7 ^a
Altura de planta (cm)	24.9 ± 4.9 ^a	25.2 ± 4.3 ^a	25.4 ± 4.2 ^a	25.3 ± 4.5 ^a
Número de vainas por planta	26.2 ± 10.2 ^{ab}	28.4 ± 8.9 ^a	28.9 ± 8.6 ^a	28.2 ± 8.1 ^a
Número de semillas por vaina	5.0 ± 0.7 ^a	5.1 ± 0.7 ^a	5.3 ± 0.6 ^a	5.3 ± 0.7 ^a
Biomasa (kg/ha)	5 537.5 ± 1 572.1 ^a	5 105.3 ± 1 753.9 ^b	5 442.3 ± 1 663.4 ^a	4 654.5 ± 1 537.6 ^c
Peso de 100 semillas (g)	20.6 ± 10.5 ^b	21.0 ± 10.6 ^{ab}	21.1 ± 10.5 ^a	20.9 ± 10.4 ^{ab}
Rendimiento de grano (kg/ha)	1 451.5 ± 873.8 ^b	1 955.50 ± 967.1 ^a	2 037.0 ± 1 017.2 ^a	1 899.0 ± 762.5 ^a
Índice de cosecha (%)	26.4 ± 11.8 ^c	37.4 ± 16.6 ^b	36.4 ± 17.3 ^b	41.4 ± 15.4 ^a

Se muestran valores promedio ± desviación estándar.

^{a,b} Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$) entre tratamientos (columnas) para un mismo parámetro evaluado (hileras).

ble a los tratamientos de micronutrientes. El Mg elevó el rendimiento y el peso de 100 semillas en ambas especies y variedades evaluadas con fertilización foliar.

Los tratamientos individuales de B y Mg, mostraron efectos similares a la combinación B + Mg en la mayoría de los diferentes aspectos agronómicos, aunque la mezcla presentó mayores valores ($P \leq 0.05$) de biomasa e IC (Tabla 4). Sin embargo, este efecto de mejora fue distinto para las dos especies (Tabla 5), sugiriendo que no existe un efecto sinérgico entre estos micronutrientes bajo las condiciones del estudio. El que la aplicación de los dos elementos juntos, B + Mg, no mostrase una ventaja consistente sobre su administración individual en las diferentes características evaluadas, sugiere posibles interacciones antagónicas, o que las dosis óptimas de cada elemento cambian cuando se aplican en combinación.

Siddiqui y col. (2018) señalaron que el Mg ayuda en la protección de las plantas contra el estrés por calor al aumentar el área foliar, lo que resulta en mayor materia seca. Stagnari y col. (2009) estudiaron el efecto de la fertilización foliar de Mg (56 g/ha, 112 g/ha y 224 g/ha en aplicación única en la floración o dividiendo la administración en dos etapas, la mitad en etapa de cuatro hojas y la mitad en la floración) en dos genotipos de frijol ejotero, Bronco y Cadillac, y observaron que la fertilización en una sola dosis, incrementó de manera significativa el rendimiento de vainas frescas, en cada una de las 2 variedades estudiadas (78 % y 32 %, respectivamente). La aplicación dividida de Mg en dos etapas también fue efectiva al elevar el rendimiento en 109 % y 50 % para los 2 genotipos estudiados, respectivamente.

El incremento en las variables agronómicas por la adición de los minerales solos o combinados es relevante, considerando que, bajo estrés térmico severo, mantener o mejorar ligeramente el peso de semillas representa una ventaja adaptativa importante, ya que normalmente el estrés por calor reduce significativamente este parámetro (Porch y Jahn, 2001).

En términos prácticos, dicho aumento podría traducirse en mejor calidad comercial y vigor de la semilla, aspectos críticos para la productividad en ciclos subsecuentes bajo condiciones adversas, lo anterior podría deberse a la protección que aporta ese elemento al polen, principalmente en la etapa reproductiva, etapa extremadamente sensible al estrés por calor (Porch y Jahn, 2001). Un balance adecuado en la nutrición de los cultivos influye positivamente en su desarrollo vegetativo y reproductivo (Feng y col., 2023). Los resultados obtenidos muestran respuesta positiva en los parámetros de rendimiento para ambos nutrientes en los genotipos de frijol evaluados bajo las condiciones de estrés térmico del estudio.

Un hallazgo destacado fue que el testigo reportó la mayor biomasa (5 537.5 kg/ha) pero el menor IC (26.4 %), mientras que los tratamientos con fertilización foliar (B y/o Mg), presentaron menor biomasa, pero mayor eficiencia en la partición de asimilados hacia el grano (IC: 37.8 % a 41.4 %) (Tabla 4). Esto sugiere que, bajo estrés térmico, las plantas sin fertilización foliar destinan mayor proporción de fotoasimilados al crecimiento vegetativo como mecanismo de supervivencia, reduciendo la inversión reproductiva. La aplicación de B y Mg mejoró la eficiencia reproductiva probablemente al optimizar procesos críticos como la formación del tubo polínico (B) y la actividad enzimática fotosintética (Mg), favoreciendo la translocación de carbohidratos hacia los órganos reproductivos. Este fenómeno es consistente con lo reportado por Polania y col. (2016) en condiciones de estrés abiótico, donde la nutrición balanceada mejoró la partición de asimilados hacia el rendimiento económico.

Los tratamientos con fertilización foliar en cada genotipo revelaron respuestas diferenciales entre especies y variedades (Tabla 5). En la especie de *P. vulgaris*, el testigo de Granada mostró rendimientos de 1 398 kg/ha que fueron superados por los 3 tratamientos, siendo el de Mg el que obtuvo el mayor valor con 2 249 kg/ha; en tanto que, en Rarámuri, el testigo presentó 1 699 kg/ha, valor que fue supera-

■ Tabla 5. Efecto de los tratamientos de fertilización en las características agronómicas de los dos genotipos de frijol de *P. acutifolius*.

Table 5. Effect of fertilization treatments on the agronomic characteristics of the two *P. acutifolius* bean genotypes.

Parámetro	Testigo	B	Mg	B + Mg
<i>P. acutifolius</i>				
Alubia Choix				
Días a floración	41.7 ± 2.6 ^a	42.5 ± 2.7 ^a	42.5 ± 2.7 ^a	41.7 ± 2.6 ^a
Altura de planta (cm)	19.9 ± 1.9 ^a	21.3 ± 1.8 ^a	21.5 ± 1.7 ^a	21.4 ± 1.6 ^a
Número de vainas por planta	22.5 ± 9.5 ^{ab}	24.8 ± 8.7 ^a	22.7 ± 8.9 ^{ab}	24.0 ± 9.1 ^a
Número de semillas por vaina	4.8 ± 0.7 ^a	4.5 ± 0.6 ^a	5.2 ± 0.8 ^a	4.8 ± 0.7 ^a
Biomasa (kg/ha)	5 755 ± 1 809 ^a	4 229 ± 1 616 ^b	4 914 ± 1 592 ^a	3 467 ± 1 281 ^c
Peso de 100 semillas (g)	11.4 ± 0.7 ^a	11.6 ± 0.6 ^a	11.5 ± 0.6 ^a	11.8 ± 0.7 ^a
Rendimiento de grano (kg/ha)	1 377 ± 987 ^b	1 852 ± 923 ^a	1 764 ± 945 ^{ab}	1 639 ± 856 ^{ab}
Índice de cosecha (%)	20.9 ± 17.8 ^c	37.1 ± 16.2 ^{ab}	30.4 ± 15.8 ^b	45.2 ± 18.4 ^a
TARS-Tep 23				
Días a floración	46.7 ± 2.9 ^a	46.7 ± 2.9 ^a	46.7 ± 2.9 ^a	46.7 ± 2.9 ^a
Altura de planta (cm)	21.5 ± 0.7 ^a	21.7 ± 0.8 ^a	20.6 ± 0.9 ^a	22.1 ± 0.6 ^a
Número de vainas por planta	24.8 ± 8.7 ^b	28.8 ± 7.9 ^a	28.3 ± 8.2 ^a	28.8 ± 8.1 ^a
Número de semillas por vaina	4.5 ± 0.9 ^a	4.8 ± 0.8 ^a	5.0 ± 0.7 ^a	5.3 ± 0.6 ^a
Biomasa (kg/ha)	5 146 ± 1 616 ^b	5 601 ± 1 498 ^{ab}	6 429 ± 1 725 ^a	6 165 ± 1 632 ^a
Peso de 100 semillas (g)	12.5 ± 0.5 ^a	13.3 ± 0.4 ^a	13.3 ± 0.5 ^a	13.1 ± 0.4 ^a
Rendimiento de grano (kg/ha)	1 332 ± 84 ^b	1 413 ± 798 ^b	1 537 ± 823 ^{ab}	1 737 ± 845 ^a
Índice de cosecha (%)	22.9 ± 10.2 ^b	23.5 ± 9.8 ^b	21.4 ± 9.5 ^b	26.1 ± 10.8 ^a
<i>P. vulgaris</i>				
Granada				
Días a floración	48.3 ± 4.0 ^a	49.2 ± 3.8 ^a	47.5 ± 3.9 ^a	48.3 ± 4.0 ^a
Altura de planta (cm)	27.2 ± 1.4 ^a	25.7 ± 1.3 ^a	27.0 ± 1.5 ^a	25.7 ± 1.2 ^a
Número de vainas por planta	30.2 ± 5.8 ^a	29.8 ± 6.1 ^a	32.2 ± 5.5 ^a	30.0 ± 6.0 ^a
Número de semillas por vaina	5.3 ± 0.4 ^a	5.7 ± 0.5 ^a	5.3 ± 0.4 ^a	5.2 ± 0.4 ^a
Biomasa (kg/ha)	4 386 ± 1 993 ^a	4 149 ± 1 856 ^{ab}	4 720 ± 1 945 ^a	4 598 ± 1 823 ^a
Peso de 100 semillas (g)	25.7 ± 0.7 ^a	26.3 ± 0.6 ^a	26.3 ± 0.7 ^a	26.4 ± 0.6 ^a
Rendimiento de grano (kg/ha)	1 398 ± 734 ^b	2 222 ± 698 ^a	2 249 ± 765 ^a	2 022 ± 687 ^a
Índice de cosecha (%)	29.7 ± 13.2 ^b	53.2 ± 12.8 ^a	47.9 ± 13.5 ^{ab}	43.9 ± 12.9 ^{ab}
Rarámuri				
Días a floración	45.0 ± 2.9 ^a	47.5 ± 2.8 ^a	47.5 ± 2.8 ^a	46.7 ± 2.9 ^a
Altura de planta (cm)	30.9 ± 1.0 ^a	32.2 ± 0.9 ^a	32.5 ± 1.1 ^a	32.0 ± 0.8 ^a
Número de vainas por planta	27.3 ± 6.4 ^{ab}	30.3 ± 6.8 ^a	32.3 ± 6.2 ^a	29.8 ± 6.5 ^a
Número de semillas por vaina	5.3 ± 0.6 ^a	5.5 ± 0.5 ^a	5.5 ± 0.6 ^a	5.7 ± 0.4 ^a
Biomasa (kg/ha)	6 863 ± 1 481 ^a	6 442 ± 1 398 ^a	5 706 ± 1 523 ^{ab}	4 388 ± 1 325 ^b
Peso de 100 semillas (g)	32.8 ± 0.8 ^a	32.9 ± 0.7 ^a	33.3 ± 0.8 ^a	32.2 ± 0.7 ^a
Rendimiento de grano (kg/ha)	1 699 ± 660 ^b	2 335 ± 623 ^a	2 598 ± 689 ^a	2 198 ± 645 ^{ab}
Índice de cosecha (%)	24.2 ± 12.4 ^c	35.9 ± 11.8 ^b	45.7 ± 12.6 ^{ab}	50.3 ± 13.1 ^a

do por los tratamientos de B y Mg, siendo este último el de mayor rendimiento (2 598 kg/ha). En contraste, los genotipos de *P. acutifolius* mostraron menor respuesta, sin embargo, tuvie-

ron el mismo comportamiento que *P. vulgaris*; el testigo de Alubia Choix registró el valor inferior con 1 377 kg/ha; B reportó el valor máximo con 1 852 kg/ha. En TARS-Tep 23, el testi-

go obtuvo 1 332 kg/ha y B + Mg el mayor valor (1 737 kg/ha). Estos resultados evidencian que *P. vulgaris* fue más responsivo a la aplicación de micronutrientes que *P. acutifolius*, y ambos genotipos presentaron respuesta diferenciada.

La mejora en el rendimiento se asoció con características como mayor número de vainas por planta (Rarámuri: 32.3, 30.3 y 29.8 vainas para Mg, B y B + Mg vs 27.3 vainas en el testigo) y mayor IC (45.7 %, 35.9 % y 50.3 %, respectivamente, vs 24.2 % en el testigo). Altos valores de IC se asociaron con la obtención de rendimientos superiores en los tratamientos con fertilización foliar, lo que sugiere un efecto de los nutrientes aplicados en la asignación de asimilados a las estructuras reproductivas, aunque paradójicamente el testigo produjo la mayor biomasa total (6 863 kg/ha). Ello indica que, los micronutrientes mejoraron la eficiencia de partición hacia grano más que la producción total de biomasa. Siddiqui y col. (2018), reportaron resultados en *Vicia faba*, donde encontraron que la aplicación de Mg a la planta bajo condiciones de estrés por calor aumenta significativamente hasta un 53.14 % el área foliar, además de elevar la concentración de osmoprotectores como prolina (PRO) y glicina betaína (GB) en un 43.31 % y 47.10 %, respectivamente, en comparación con el testigo sin estrés por altas temperaturas.

En *P. acutifolius*, los tratamientos con fertilización foliar mejoraron significativamente el rendimiento de grano comparado con el testigo, especialmente en Alubia Choix, donde el tratamiento con B incrementó el rendimiento de 1 377 kg/ha a 1 852 kg/ha. El IC mostró las mejores respuestas, alcanzando valores superiores con la combinación B + Mg (45.2 %) en Alubia Choix, comparado con el testigo (20.9 %). En TARS-Tep 23, la aplicación de Mg favoreció significativamente la acumulación de biomasa (6 429 kg/ha vs 5 146 kg/ha del testigo), aunque el rendimiento de grano se mantuvo relativamente bajo en comparación con *P. vulgaris*. En *P. vulgaris*, la respuesta a la fertilización foliar fue más pronunciada. Granada mostró

incrementos notables en rendimiento con los tratamientos B y Mg (2 222 kg/ha y 2 249 kg/ha, respectivamente) comparado con el testigo (1 398 kg/ha). El IC en Granada aumentó significativamente con la aplicación de B (53.2 % vs 29.7 % del testigo), indicando una mejor partición de fotoasimilados hacia estructuras reproductivas. Rarámuri, la variedad de mayor rendimiento, respondió favorablemente a todos los tratamientos, alcanzando su mejor desempeño con Mg (2 598 kg/ha) y manteniendo el mayor IC con B + Mg (50.3 %).

Ambas variedades de frijol mostraron mejoras sustanciales en el IC con los tratamientos de micronutrientes, confirmandola eficiencia de la fertilización foliar en la partición de asimilados hacia órganos reproductivos bajo condiciones de estrés térmico.

Análisis de correlación

El análisis de correlación general reveló las interrelaciones entre las variables agronómicas evaluadas, independientemente del tratamiento de fertilización aplicado (Tabla 6). Los días a la floración mostraron correlaciones muy fuertes con la altura de planta ($r = 0.93^{***}$), el peso de 100 semillas ($r = 0.94^{***}$) y número de vainas por planta (0.82^{***}); fuertes con el rendimiento ($r = 0.52^{***}$) y la biomasa ($r = 0.55^{***}$); y correlación débil con el IC ($r = 0.21^*$). Esto indica que los genotipos con floración más tardía tendieron a tener plantas con mayor altura, producir semillas de mayor peso y mayor rendimiento, posiblemente por evadir parcialmente el estrés térmico temprano o por tener mayor tasa de llenado de vainas.

La altura de planta mostró correlaciones muy fuertes con el peso de 100 semillas ($r = 0.97^{***}$) y con el número de vainas por planta ($r = 0.74^{***}$), confirmando que plantas más altas tendieron a acumular mayor materia seca y producir más vainas. También reportó correlaciones moderadas con el rendimiento ($r = 0.42^{***}$), biomasa ($r = 0.38^{***}$) y número de semillas por vaina ($r = 0.33^{**}$). El número de vainas por planta presentó correlaciones muy fuertes con el peso de 100 semillas ($r = 0.73^{***}$) y rendimiento

■ Tabla 6. Coeficientes de correlación entre pares de variables determinadas en cuatro tratamientos de fertilización foliar de cuatro genotipos de frijol de las especies *P. vulgaris* y *P. acutifolius*.

Table 6. Correlation coefficients between pairs of variables determined in four foliar fertilization treatments of four bean genotypes of the species *P. vulgaris* and *P. acutifolius*.

	DF	ALT	NVP	NSV	BIO	P100S	RTO	IC
DF	1.00							
ALT	0.93***	1.00						
NVP	0.82***	0.74***	1.00					
NSV	0.32**	0.33**	0.22*	1.00				
BIO	0.55***	0.38***	0.65***	- 0.08 ns	1.00			
P100S	0.94***	0.97***	0.73***	0.29**	0.42***	1.00		
RTO	0.52***	0.42***	0.71***	0.08ns	0.57***	0.46***	1.00	
IC	0.21*	0.15ns	0.26*	0.11ns	0.19ns	0.17ns	0.82***	1.00

Escala de Cohen (1988): débil ($r = 0.10$ a 0.29), moderada ($r = 0.30$ a 0.49), fuerte ($r = 0.50$ a 0.70) y muy fuerte ($r > 0.70$). Los niveles de significancia estadística se indican como: *** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, ns = no significativo ($P \geq 0.05$). DF: días a floración, ALT: altura de planta, NVP: número de vainas por planta, NSV: número de semillas por vaina, BIO: biomasa aérea, P100S: peso de 100 semillas, RTO: rendimiento, IC: índice de cosecha.

($r = 0.71^{***}$), mientras que con biomasa tuvo una correlación moderada (0.65^{***}). Esto muestra al número de vainas como un componente importante en la productividad del frijol, tal y como lo observaron Anaya-López y col. (2022) en la misma localidad de prueba.

La biomasa presentó correlaciones positivas fuertes con el rendimiento ($r = 0.57^{***}$), y moderadas con el peso de 100 semillas ($r = 0.42^{***}$), indicando que la capacidad de acumulación de materia seca contribuye al rendimiento final.

El rendimiento mostró una correlación positiva muy fuerte con el IC ($r = 0.82^{***}$), confirmando su papel como indicador de eficiencia en la partición de fotoasimilados hacia estructuras reproductivas.

Sin embargo, el IC tuvo correlaciones no significativas con la biomasa ($r = 0.19$), el peso de 100 semillas ($r = 0.17$), el número de semillas por vaina ($r = 0.11$) y con altura de planta ($r = 0.15$).

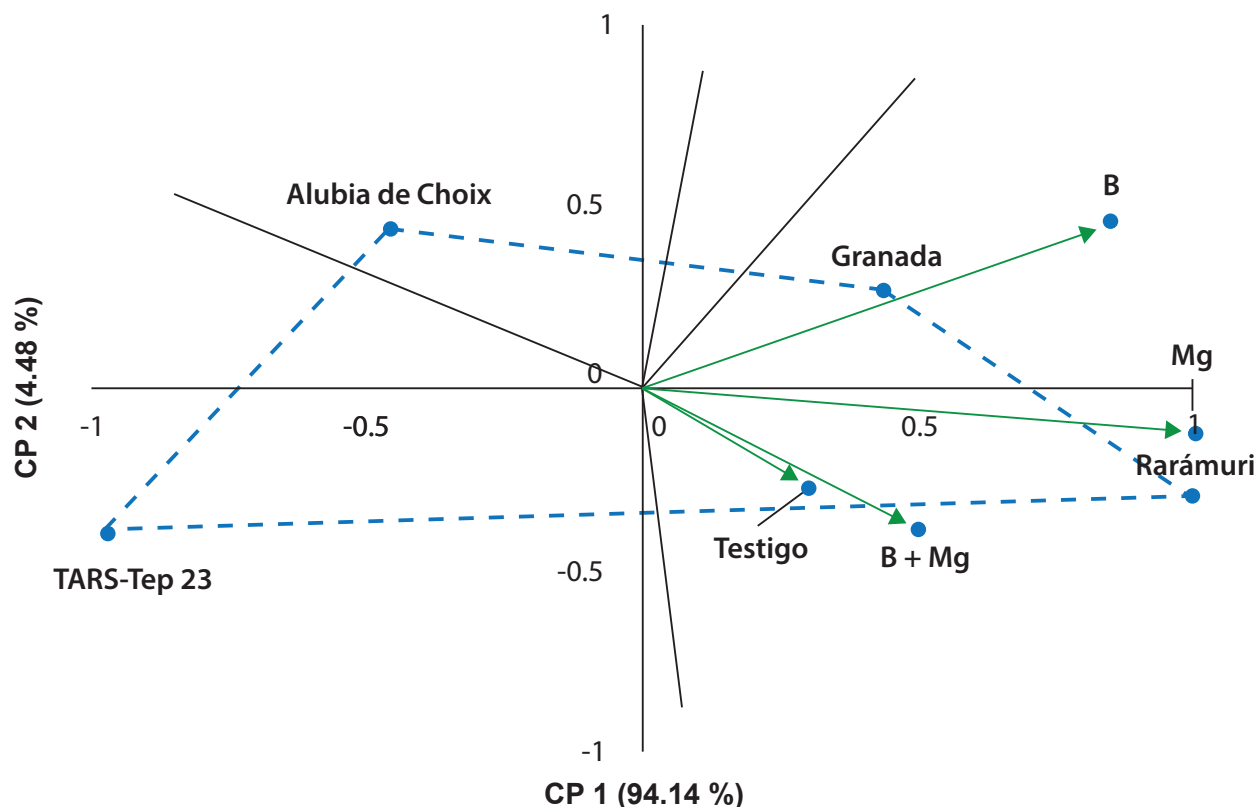
Estas correlaciones generales proporcionan el contexto para interpretar cómo los tratamientos de fertilización foliar influyeron en las variables de respuesta, considerando sus inte-

rrrelaciones naturales en el germoplasma evaluado.

Interacción genotipo por tratamiento

El análisis de la interacción entre genotipos y tratamientos de fertilización foliar, para el rendimiento, mostró que los dos primeros componentes principales explicaron el 98.62 % de la variación total (CP1 = 94.14 % y CP2 = 4.48 %), siendo el primer componente el que explicó la mayor proporción (Figura 2). El CP1 se asoció principalmente con el rendimiento del grano, mientras que el CP2 reflejó la respuesta diferencial a los tratamientos de fertilización foliar. En el biplot se observa la respuesta diferencial de los genotipos según su especie: los genotipos de *P. vulgaris* (Rarámuri y Granada) se ubicaron en el sector positivo del CP1 y mostraron respuesta positiva a la aplicación de fertilización foliar con B y Mg, mientras que los genotipos de *P. acutifolius* (Alubia Choix y TARS-Tep 23) presentaron una respuesta diferente a estos tratamientos.

En el cuadrante inferior derecho (valores positivos de CP1 y CP2) se ubicaron Rarámuri junto con los tratamientos Mg y B + Mg, indicando la mayor afinidad de esta variedad de *P. vulgaris* con la fertilización foliar. Granada



■ Figura 2. Parámetros de rendimiento, promedio de 2 años de estudio, de cuatro genotipos de frijol, dos de *P. vulgaris* y dos de *P. acutifolius* producidos bajo diferentes tratamientos de fertilización foliar con Boro (B) y Magnesio (Mg) y su combinación (B + Mg).

Figure 2. Yield parameters, average of 2 years of study, of four bean genotypes, two of *P. vulgaris* and two of *P. acutifolius* grown under different foliar fertilization treatments with Boron (B) and Magnesium (Mg) and its combination (B + Mg).

se posicionó en el cuadrante superior derecho, mostrando también respuesta favorable pero diferente a Rarámuri (Mg y B). Los tratamientos B y Mg se posicionaron muy próximos entre sí en el biplot, sugiriendo efectos similares sobre el rendimiento.

El tratamiento testigo se localizó en el cuadrante inferior derecho, aunque más cercano a la parte de la recta numérica negativa vertical, y al 0 de la horizontal, lo que indica diferencias en los requerimientos nutrimentales, ya que está próximo a B + Mg. Los genotipos de *P. acutifolius* (Alubia Choix y TARS-Tep 23) también se distribuyeron en diferentes cuadrantes, indicando respuestas variables entre ellos. TARS-Tep 23 se ubicó en el cuadrante inferior izquierdo, lo que sugiere diferencias en los requerimientos nutricionales y/o mecanis-

mos de absorción y utilización de micronutrientes entre especies. La fertilización combinada B + Mg se posicionó cerca del centro del biplot, indicando que mostró un efecto intermedio comparado con las aplicaciones individuales.

La respuesta diferencial de *P. acutifolius* a la fertilización foliar puede explicarse por diferencias intrínsecas en los mecanismos de absorción y translocación de micronutrientes entre especies. El frijol Tepari, adaptado evolutivamente a condiciones áridas con suelos de baja fertilidad, podría presentar menor capacidad de absorción foliar de B y Mg, o bien, sistemas de transporte internos menos eficientes para estos elementos (Rainey y Griffiths, 2005). Alternativamente, es posible que *P. acutifolius* requiera concentraciones o formula-

ciones diferentes de estos micronutrientes, o que su metabolismo celular bajo estrés térmico no se beneficie de la misma manera que *P. vulgaris*, de la aplicación exógena de estos elementos (Bornowski y col., 2023).

La posición de Rarámuri, en el extremo positivo del CP1 refleja su superioridad en rendimiento y respuesta a fertilización foliar (Figura 2). Estos resultados de la variedad Rarámuri se asociaron con el mayor rendimiento de grano, altura de planta, biomasa y peso de 100 semillas (Tabla 5), variables estrechamente ligadas con el rendimiento, como se confirmó en el análisis de correlación (Tabla 6). Klaedtke y col. (2012) reportaron que una mayor altura de planta está involucrada en una producción superior de biomasa, y este volumen de biomasa, puede significar mayor disponibilidad de fotoasimilados para la removilización y asignación de reservas de los tallos y ramas hacia las vainas y semillas, mejorando así los rendimientos bajo condiciones de estrés abiótico. Tene y col. (2023) analizaron la resistencia a calor de una amplia muestra de germoplasma de *P. vulgaris* y de otras especies del género *Phaseolus*, y señalaron que, aunque la mayoría de los genotipos estudiados de las especies *P. acutifolius*, *P. luna-*

tus y *P. coccineus*, resultaron más resistentes al calor que la mayoría de los genotipos de *P. vulgaris*, algunos genotipos de frijol común mostraron una respuesta similar a la de esas especies. Los resultados del presente trabajo confirman esta variabilidad intraespecífica, ya que Rarámuri tuvo una mejor adaptación relativa al estrés térmico comparado con Granada, evidenciado en su superior rendimiento bajo las condiciones del estudio. En su investigación, Tene y col. (2023), entre otras características agronómicas, encontraron que la biomasa mostró los efectos directos más altos en las calificaciones de resistencia al estrés por calor, lo que es consistente con los resultados obtenidos en este estudio, donde la mayor biomasa de Rarámuri se asoció con su superior rendimiento.

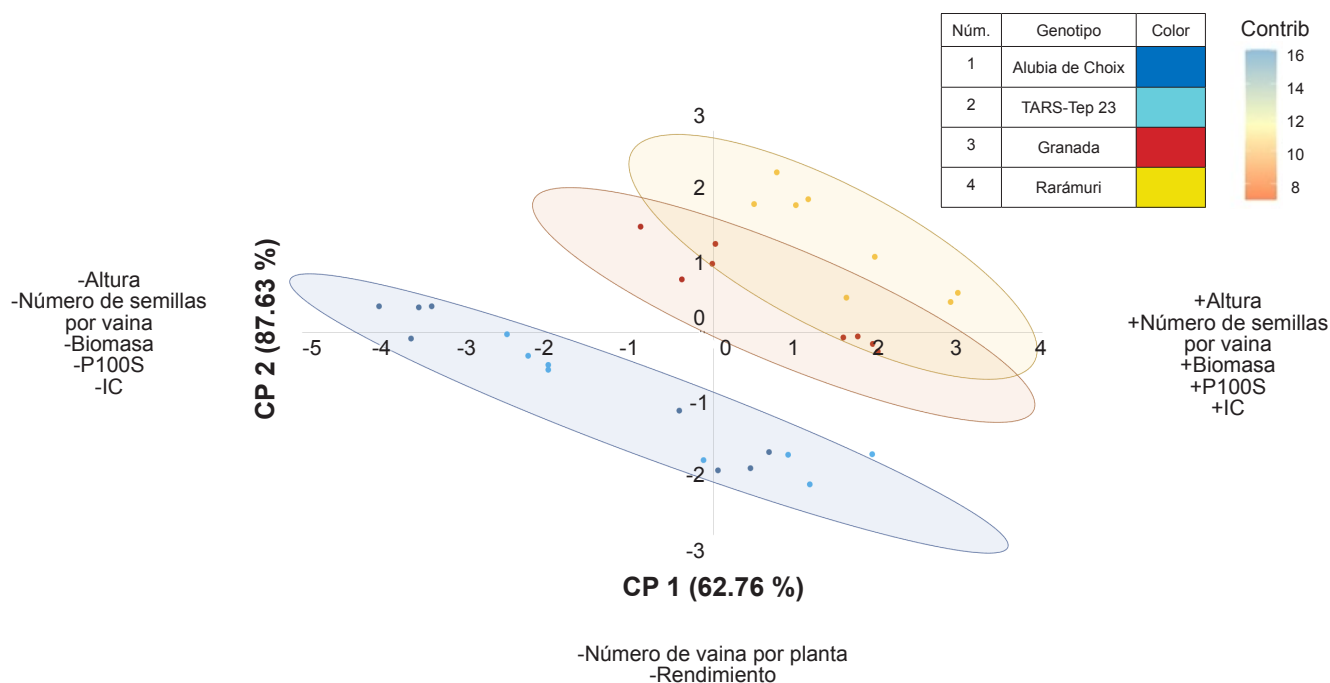
Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales de las variables agronómicas (Tabla 7) mostró que los primeros dos componentes explicaron el 87.63 % de la variación total (Figura 3). El CP1 con el 62.76 % de la variación estuvo definido principalmente por las variables número de vainas por planta y rendimiento, variables que entre sí presentaron una correlación positiva moderada ($r = 0.71^{***}$) (Tabla 6).

■ **Tabla 7. Análisis de componentes principales de variables agronómicas en cuatro genotipos de frijol bajo cuatro tratamientos de fertilización foliar.**

Table 7. Principal component analysis of agronomic variables in four bean genotypes under four foliar fertilization treatments.

Variable	CP1	CP2	Comunalidad
Días a floración	0.945	-0.046	0.895
Altura de planta	0.916	0.143	0.86
Número de vainas por planta	0.786	-0.337	0.731
Peso de 100 semillas	0.945	0.082	0.9
Rendimiento	0.57	0.738	0.869
Índice de cosecha	0.254	0.926	0.922
Biomasa	0.542	-0.322	0.397
Eigenvalue	4.393	1.741	
% Varianza explicada	62.76	24.87	
% Varianza acumulada	62.76	87.63	



■ Figura 3. Biplot de la contribución al rendimiento promedio de dos ciclos de cultivo, cuatro genotipos de frijol, dos de *P. vulgaris* y dos de *P. acutifolius*, y cuatro tratamientos de fertilización foliar. Los dos primeros componentes explicaron 87.63 % de la variación observada. Las tres elipses representan a cada genotipo y su respuesta a los factores en estudio. Las flechas son los valores 'eigen' que representan la contribución de cada característica.

Figure 3. Biplot of the contribution toward seed yield, average of two crop cycles, four bean genotypes, two of *P. vulgaris* and two of *P. acutifolius* and four foliar fertilization treatments. The first two components explained 87.63 % of the observed variation. The three ellipses represent each genotype and their response to the different factors studied. The arrows are the eigen values that represent the contribution of each trait.

El CP2, con una aportación a la varianza total del 24.87 %, se constituyó principalmente por las variables altura, número de semillas por vaina, biomasa, peso de 100 semillas (Figura 3), rasgos que también mostraron asociación positiva en el análisis de correlación (Tabla 6).

Esta separación en dos componentes principales indica que el rendimiento está determinado por dos estrategias principales: una basada en componentes reproductivos (vainas, semillas, días a floración) y otra en vigor vegetativo (altura, biomasa, peso de semillas).

Los resultados del análisis biplot (Figura 3) y los valores del CP1 con mayor contribución a la variabilidad total permitieron separar la población de datos en tres grupos distintos,

como se observa en las elipses de confianza. El grupo superior (elipse amarilla) corresponde principalmente a los genotipos de *P. vulgaris* (Rarámuri y Granada) bajo tratamientos de fertilización foliar, caracterizados por valores positivos en ambos componentes principales. El grupo central (elipse naranja) incluye a los genotipos de *P. vulgaris* bajo condiciones de testigo, con valores intermedios. El grupo inferior (elipse azul) agrupa a los genotipos de *P. acutifolius* (Alubia Choix y TARS-Tep 23) bajo todos los tratamientos, ubicados en valores negativos del CP1. A pesar de provenir de sitios geográficos diferentes, uno de México y otro de Puerto Rico, estas variedades mostraron comportamiento similar bajo las condiciones del estudio. La clara separación en tres grupos refleja las diferencias in-

trínsecas entre especies y la respuesta diferencial a la fertilización foliar. En la localidad de prueba, representativa de la región de El Bajío, las variedades de *P. vulgaris* resultaron superiores a las de *P. acutifolius* en la mayoría de las variables evaluadas, especialmente cuando se aplicaron tratamientos de fertilización foliar, confirmando la mejor adaptación del frijol común a estas condiciones agroecológicas y su mayor respuesta a la nutrición foliar. La respuesta superior de los genotipos de *P. vulgaris* sobre los de *P. acutifolius* en condiciones de altas temperaturas, contradice la percepción tradicional que señala al frijol Tepari como más tolerante al calor (Rainey y Griffiths, 2005). Este hallazgo sugiere que la adaptación al estrés térmico es un fenómeno complejo que involucra tanto la constitución genética como la capacidad de respuesta a intervenciones nutricionales.

Análisis de semilla por efecto de genotipo y tratamiento de fertilización foliar

No hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre genotipos para la variable de germinación, resultando todos los materiales con germinación superior al 90 % (Tabla 8). La prueba de vigor (emergencia de radícula a los 4 d) mostró diferencias significativas ($P \leq 0.05$)

entre genotipos, resultando superiores los genotipos de *P. acutifolius* en comparación con *P. vulgaris*, desde un 10 % más de raíces emergidas en 4 d. Este resultado se debe probablemente a una cubierta de la testa de menor grosor que la de *P. vulgaris*, tal y como lo indican Jiménez-Galindo y Acosta-Gallegos (2012), quienes mencionaron que en algunos materiales, la germinación se genera a partir del segundo día después de que se presenten las condiciones favorables para la germinación por su rápida absorción de agua.

Prueba de germinación y vigor de semilla por efecto de tratamiento

Los tratamientos de fertilización foliar afectaron significativamente la calidad de semilla cosechada. Los tratamientos B, Mg y B + Mg alcanzaron valores de germinación superiores al 92 %, mientras que el testigo obtuvo un 88.3 % (Tabla 9). La emergencia de radícula se incrementó de 64.5 % en el testigo hasta 68 % o 69 % en los tratamientos con fertilización foliar. Hubo diferencias significativas en el número de semillas muertas, con respecto al testigo, que presentó un mayor número, así como un menor porcentaje de plántulas normales, lo que tuvo como resultado un porcentaje más bajo de germinación. Esto indica que,

■ **Tabla 8. Prueba de germinación y vigor de 50 semillas de cuatro genotipos de frijol, dos de *P. vulgaris* y dos de *P. acutifolius*, producidas bajo tratamientos de B y Mg.**

Table 8. Germination and vigor test of 50 seeds of four bean genotypes, two of *P. vulgaris* and two of *P. acutifolius*, produced under B and Mg treatments.

Parámetro	<i>P. acutifolius</i>		<i>P. vulgaris</i>	
	Alubia Choix	TARS-Tep 23	Granada	Rarámuri
Normal	48.4 ± 0.5 ^a	48.0 ± 1.4 ^a	48.5 ± 0.7 ^a	48.3 ± 0.7 ^a
Anormal	0.5 ± 0.7 ^b	1.4 ± 1.0 ^a	0.7 ± 0.5 ^b	0.7 ± 0.8 ^b
Muerta	1.1 ± 0.8 ^a	0.7 ± 1.2 ^a	0.9 ± 1.0 ^a	1.0 ± 1.2 ^a
Germinación (%)	92.1 ± 2.8 ^a	90.4 ± 6.4 ^a	92.5 ± 4.8 ^a	91.5 ± 5.2 ^a
Peso fresco de plántula (g)	16.0 ± 2.2 ^c	12.4 ± 2.3 ^d	20.4 ± 4.9 ^b	27.1 ± 4.6 ^a
Peso seco de plántula	2.2 ± 0.6 ^b	2.7 ± 1.0 ^b	4.9 ± 1.3 ^a	4.1 ± 0.8 ^a
Emergencia de radícula*	75 ± 2.3 ^a	71 ± 2.6 ^a	60 ± 2.5 ^b	63 ± 1.8 ^b

*A 4 d de la siembra.

Se muestran valores promedio ± desviación estándar.

^{a,b}Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$) entre genotipos (columnas) para un mismo parámetro evaluado (hileras).

■ Tabla 9. Prueba de germinación y vigor de semillas de cuatro genotipos de frijol por efecto de tratamientos de B y Mg.

Table 9. Seed germination and vigor test of four bean genotypes by effect of B and Mg treatments.

Parámetro	Testigo	B	Mg	B + Mg
Normal	47.7 ± 1.0 ^b	48.5 ± 0.7 ^a	48.5 ± 0.7 ^a	48.5 ± 0.9 ^a
Anormal	1.0 ± 1.0 ^a	0.7 ± 0.8 ^a	0.7 ± 1.0 ^a	0.9 ± 0.8 ^a
Muerta	1.7 ± 1.4 ^a	0.7 ± 0.8 ^b	0.7 ± 0.9 ^b	0.6 ± 0.7 ^b
Germinación (%)	88.3 ± 5.8 ^b	92.7 ± 4.2 ^a	92.7 ± 4.0 ^a	92.7 ± 4.8 ^a
Peso fresco de plántula (g)	17.7 ± 6.5 ^b	18.7 ± 6.8 ^{ab}	20.1 ± 7.1 ^a	19.5 ± 7.2 ^{ab}
Peso seco de plántula	3.2 ± 1.6 ^a	3.5 ± 1.5 ^a	3.8 ± 1.7 ^a	3.3 ± 1.3 ^a
Emergencia de radícula*	64.5 ± 3.2 ^a	68.0 ± 2.8 ^a	68.0 ± 2.6 ^a	69.0 ± 3.1 ^a

*A 4 d de la siembra.

Se muestran valores promedio ± desviación estándar.

^{a,b}Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$) entre tratamientos (columnas) para un mismo parámetro evaluado (hileras).

la semilla tratada con fertilización foliar usando B y Mg fue superior significativamente en calidad a la del testigo (Tabla 9), lo que permite recomendar este tratamiento para elevar su calidad. Los tratamientos con B y Mg mejoraron significativamente la viabilidad de la semilla, posiblemente a través de su papel en el metabolismo de carbohidratos y la síntesis de proteínas durante el desarrollo del embrión, como se observa en los valores específicos de germinación y vigor (Tabla 9).

El efecto positivo de la fertilización foliar sobre la calidad de semilla puede explicarse por varios mecanismos fisiológicos relacionados con la nutrición de la planta madre durante el llenado de grano. En la mayoría de las especies vegetales cuando sus semillas son sometidas a temperaturas mayores a 30 °C se afecta de manera directa la producción de reguladores de crecimiento como citoquininas y auxinas (Chaves-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017). Durante la etapa reproductiva para obtener las semillas utilizadas para la prueba se presentaron en campo temperaturas ≥ 30 °C. Si bien, las semillas se encuentran protegidas de manera natural dentro de las vainas, los resultados obtenidos mostraron mayor cantidad de semillas muertas en el tratamiento testigo, lo que conlleva a una menor germinación en comparación con los tratamientos donde la se-

milla se produjo bajo aplicación de nutrición foliar con B y Mg. En el caso del tratamiento testigo sin la fertilización foliar, se incrementó la presencia de semillas muertas y un menor porcentaje de germinación pudo deberse a la deshidratación de los tejidos del embrión que provocan las altas temperaturas en la formación de la semilla (Chaves-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017).

Además, el peso fresco de la plántula del testigo fue inferior a todos los tratamientos con fertilización foliar, debido a que las altas temperaturas afectan considerablemente la permeabilidad de las membranas celulares en las radículas (Kurepin y col., 2015). Esta respuesta positiva de la calidad de semilla a la nutrición foliar tiene implicaciones importantes para los programas de producción de semilla de frijol, especialmente en regiones donde las altas temperaturas durante el llenado de grano pueden comprometer la viabilidad.

Los hallazgos obtenidos ofrecen alternativas viables para sistemas productivos en regiones propensas a altas temperaturas en el rango de las que se presentaron en la región donde se llevó a cabo el estudio, donde la combinación de germoplasma adaptado y manejo nutricional adecuado puede constituir una estrategia integral para mantener la producción de frijol

ante condiciones ambientales cada vez más extremas. Sin embargo, es importante reconocer que una limitación del presente estudio es la ausencia de un diseño experimental que incluya diferentes niveles controlados de temperatura, lo cual dificulta atribuir los efectos observados exclusivamente al estrés térmico. No obstante, los resultados obtenidos reflejan la respuesta de los genotipos y tratamientos bajo las condiciones térmicas naturales prevalientes durante los años de evaluación, por lo que futuras investigaciones deberían considerar, el uso de ambientes controlados o contrastantes para confirmar los mecanismos específicos de tolerancia al estrés por temperatura.

CONCLUSIONES

La fertilización foliar con micronutrientes demostró ser una estrategia efectiva para contrarrestar los efectos adversos de las altas temperaturas en el cultivo de frijol, evidenciando mecanismos diferenciales de respuesta entre especies y variedades. Este estudio revela que la aplicación de B y Mg, particularmente este último, no solo mejora parámetros productivos, sino que también influye positivamente en la calidad fisiológica de la semilla, aspecto fundamental para mantener la viabilidad del material genético en condiciones de estrés térmico. La respuesta superior

de los genotipos de *P. vulgaris* sobre los de *P. acutifolius* en condiciones de altas temperaturas contradice la percepción tradicional que señala al frijol Tepari como más tolerante al calor. Este hallazgo sugiere que la adaptación al estrés térmico es un fenómeno complejo que involucra tanto la constitución genética como la capacidad de respuesta a intervenciones nutricionales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el financiamiento otorgado a través del proyecto "Desarrollo de variedades mejoradas de frijol para México" (SIGI: 16215236227). El primer autor agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por la beca nacional otorgada para realizar estudios de Maestría en Ciencias en Producción y Tecnología de Semillas, así como al Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Roque, por el apoyo brindado durante sus estudios de posgrado, del cual este trabajo forma parte de su tesis.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

REFERENCIAS

- Ahmad, W., Niaz, A., Kanwal, S., & Rasheed, K. (2009). Role of boron in plant growth: A review. *Journal of Agricultural Research*, 47(3), 329-338.
- Anaya-López, J. L., Rojas-Tovar, L. M., Cisneros-López, H. C. y Acosta-Gallegos, J. A. (2022). Rendimiento e índice de cosecha de germoplasma de frijol pinto y flor de mayo bajo estrés por temperatura alta. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(1), 33-33.
- Baloch, F. S., Nadeem, M. A., Sönmez, F., Habyarimana, E., Mustafa, Z., Karaköy, T., Cömertpay, G., Alsaleh, A., Çiftçi, V., Sun, S., Chung, G., & Chung, Y. S. (2022). Magnesium- a Forgotten Element: Phenotypic Variation and Genome Wide Association Study in Turkish Common Bean Germplasm. *Frontiers in Genetics*, 13, 848663. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.848663>
- Barrios-Gómez, E. J. y López-Castañeda, C. (2009). Temperatura base y tasa de extensión foliar en frijol. *Agrociencia*, 43(1), 29-35. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000100004
- Beebe, S. E., Rao, I. M., Cajiao, C., & Grajales, M. (2008). Selection for drought tolerance in common bean also improves yield in phosphorus limited environments. *Crop Science*, 48, 582-592
- Behera, B., Kancheti, M., Raza, M. B., Shiv, A., Mangal, V., Rathod, G., Altaf, M. A., Kumar, A., Aftab, T., Kumar, R., Tiwari, R. K., Lal, M. K., & Singh, B. (2023). Mechanistic insight on boron-mediated toxicity in plant vis-a-vis its mitigation strategies: a review. *International Journal of Phytoremediation*, 25(1), 9-26. <https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2049694>

- Bornowski, N., Hart, J. P., Palacios, A. V., Ogg, B., Brick, M. A., Hamilton, J. P., Beaver, J. S., Buell, C. R., & Porch, T. (2023). Genetic variation in a tepary bean (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) diversity panel reveals loci associated with biotic stress resistance. *The Plant Genome*, 16(3), e20363. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20363>
- Cakmak, I. y Yazici, A. (2010). Magnesio: El elemento olvidado en la producción de cultivos. *Informaciones Agronómicas-IPNI*, 94(2), 23-25. [https://www.ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/\\$file/2.+Magnesio.+El+elemento+olvidado.pdf](https://www.ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/$file/2.+Magnesio.+El+elemento+olvidado.pdf)
- Chaves-Barrantes, N. F. y Gutiérrez-Soto, M. V. (2017). Respuestas al estrés por calor en los cultivos. I. aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 237-253. <http://doi.org/10.15517/am.v28i1.21903>
- Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences (Second edition). Lawrence Erlbaum Associates.
- Feng, Y., Fan, X., Suo, D., Zhang, S., Ma, Y., Wang, H., Guan, X., Yang, H., & Wang, C. (2023). Screening of heat stress-regulating active fractions in mung beans. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1102752. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1102752>
- Jiménez-Galindo, J. C. y Acosta-Gallegos, J. A. (2012). Caracterización de genotipos criollos de frijol Tepari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) y común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(8), 1565-1577. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000800007
- Kirkby, E. & Rómheld, V. (2008). Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad. *Informaciones Agronómicas*, 68(2), 9-13. <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/MicronutrientesenlaFisiologia.pdf>
- Klaedtke, S. M., Cajiao, C., Grajales, M., Polanía, J., Borrero, G., Guerrero, A., Rivera, M., Rao, I., Beebe, S. E., & León, J. (2012). Photosynthate remobilization capacity from drought-adapted common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) lines can improve yield potential of interspecific populations within the secondary gene pool. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 4(4), 49-61. <https://doi.org/10.5897/JPBCS11.087>
- Kurepin, L. V., Park, J. M., & Lazarovits, G. (2015). Burkholderia phytofirmans-induced shoot and root growth promotion is associated with endogenous changes in plant growth hormone levels. *Plant Growth Regulation*, 75(1), 199-207. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-9944-6>
- Mora, M., Ordaz, V., Castellanos, J. Z., Santelises, A. A., Gavi, F. y Volke, V. (2001). Sistemas de labranza y sus efectos en algunas propiedades físicas en un vertisol, después de cuatro años de manejo. *Terra Latinoamericana*, 19(1), 67-74.
- Omae, H., Kumar, A., & Shono, M. (2012). Adaptation to high temperature and water deficit in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) during the reproductive period. *Journal of Botany*, 2012, 803413. <https://doi.org/10.1155/2012/803413>
- Polanía, J., Rao, I. M., Cajiao, C., Rivera, M., Raatz, B., & Beebe, S. (2016). Physiological traits associated with drought resistance in Andean and Mesoamerican genotypes of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Euphytica*, 210(1), 17-29. <https://doi.org/10.1007/s10681-016-1691-5>
- Porch, T. G. & Jahn, M. (2001). Effects of high-temperature stress on microsporogenesis in heat-sensitive and heat-tolerant genotypes of *Phaseolus vulgaris*. *Plant, Cell and Environment*, 24(7), 723-731. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00716.x>
- Rainey, K. M. y Griffiths, P. D. (2005) Respuesta diferencial de genotipos de frijol común a altas temperaturas. *Revista de la Sociedad Americana de Ciencias Hortícolas*, 130, 18-23. <https://doi.org/10.21273/JASHS.130.1.18>
- Siddiqui, M. H., Alamri, S. A., Al-Khaishany, M. Y. Y., Al-Qutami, M. A., Ali, H. M., Al-Whaibi, M. H., Al-Wahibi, M. S., & Alharby, H. F. (2018). Mitigation of adverse effects of heat stress on *Vicia faba* by exogenous application of magnesium. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(7), 1393-1401.
- Stagnari, F., Onofri, A., & Pisante, M. (2009). Response of French Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Cultivars to Foliar Applications of Magnesium. *Italian Journal of Agronomy*, 3, 101-110. <https://doi.org/10.4081/ija.2009.101>
- Tapia, G., Méndez, J., Inostroza, L., & Lozano, C. (2022). Water Shortage Affects Vegetative and Reproductive Stages of Common Bean (*Phaseolus vulgaris*) Chilean Landraces, Differentially Impacting Grain Yield Components. *Plants (Basel, Switzerland)*, 11(6), 749. <https://doi.org/10.3390/plants11060749>
- Tene, T. M., Sari, H., Canci, H., Maaruf, A., Eker, T., & Toker, C. (2023). Traits Related to Heat Stress in *Phaseolus* Species. *Agriculture*, 13(5), 953. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050953>