

Manejo de la antracnosis (*Colletotrichum lindemuthianum*) en fréjol (*Phaseolus vulgaris*) mediante la fertilización de azufre

Management of anthracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*) in common bean (*Phaseolus vulgaris*) through sulfur fertilization

Manejo da antracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*) em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) mediante fertilização de enxofre

Herrera-Eguez, Favio Eduardo
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
fherrerae@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-1376-423X>



Gaibor-Fernández, Ramiro Remigio
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
rgaibor@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0981-2000>



Bermeo-Toledo, César Ramiro
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
cbermeo@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-2803-5005>



Quintana-Vélez, Melanny Clayre
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Melannyclaire21@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-9128-2121>



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/n1/906>

Como citar:

Herrera-Eguez, F. E., Gaibor-Fernández, R. R., Bermeo-Toledo, C. R., & Quintana-Vélez, M. C. (2025). Manejo de la antracnosis (*Colletotrichum lindemuthianum*) en fréjol (*Phaseolus vulgaris*) mediante la fertilización de azufre. *Código Científico Revista De Investigación*, 6(1), 577–594. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/n1/906>

Recibido: 10/06/2025

Aceptado: 26/06/2025

Publicado: 30/06/2025

Resumen

La antracnosis, causada por el hongo *Colletotrichum lindemuthianum*, es una de las principales enfermedades que afectan al cultivo de fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.). Dado el potencial del azufre como fungicida, este estudio evaluó su eficacia en el manejo de la enfermedad. Se aplicaron seis tratamientos en un diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con tres repeticiones: un control sin aplicación (T1) y cinco dosis de azufre (5, 10, 15, 20 y 25 kg/ha; T2–T6). La severidad de la antracnosis se cuantificó mediante procesamiento digital de imágenes (Leaf Doctor) y escalas visuales, obteniéndose una alta correlación entre ambos métodos ($R^2 = 0.9715$). La dosis de 25 kg/ha mostró la menor severidad de la enfermedad, aunque no se observaron diferencias significativas en parámetros agronómicos (altura de planta, número y dimensiones de vainas) con excepción del rendimiento donde la dosis de 25 kg/ha fue 10% superior en relación con el control. Estos resultados sugieren que el azufre a una dosis de 25 kg/ha puede reducir la incidencia de antracnosis en fréjol, por lo que su inclusión en programas de fertilización podría ser una alternativa sostenible para el manejo integrado de la enfermedad.

Palabras clave: Severidad, incidencia, Leaf Doctor.

Abstract

Anthracoze, caused by the fungus *Colletotrichum lindemuthianum*, is one of the main diseases affecting the bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.). Given the potential of sulfur as a fungicide, this study evaluated its efficacy in disease management. Six treatments were applied in a Randomized Complete Block Design (RCBD) with three replications: a no application control (T1) and five sulfur doses (5, 10, 15, 20 and 25 kg/ha; T2-T6). Anthracnose severity was quantified using digital image processing (Leaf Doctor) and visual scales, obtaining a high correlation between both methods ($R^2 = 0.9715$). The 25 kg/ha dose showed the lowest disease severity, although no significant differences were observed in agronomic parameters (plant height, number and dimensions of pods) with the exception of yield, where the 25 kg/ha dose was 10% higher than the control. These results suggest that sulfur at a dose of 25 kg/ha can reduce the incidence of anthracnose in bean, so its inclusion in fertilization programs could be a sustainable alternative for the integrated management of the disease.

Keywords: Severity, incidence, Leaf Doctor.

Resumo

A antracnose, causada pelo fungo *Colletotrichum lindemuthianum*, é uma das principais doenças que afetam o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). Dado o potencial do enxofre como fungicida, este estudo avaliou sua eficácia no manejo da doença. Foram aplicados seis tratamentos num esquema de blocos completos aleatórios (RCBD) com três réplicas: uma testemunha sem aplicação (T1) e cinco doses de enxofre (5, 10, 15, 20 e 25 kg/ha; T2-T6). A severidade da antracnose foi quantificada através de processamento digital de imagens (Leaf Doctor) e escalas visuais, obtendo-se uma alta correlação entre os dois métodos ($R^2 = 0,9715$). A dose de 25 kg/ha foi a que apresentou a menor gravidade da doença, embora não tenham sido observadas diferenças significativas nos parâmetros agronômicos (altura das plantas, número e dimensões das vagens), com exceção do rendimento, em que a dose de 25 kg/ha foi 10% superior à testemunha. Estes resultados sugerem que o enxofre na dose de 25 kg/ha pode reduzir a incidência da antracnose no feijão, pelo que a sua inclusão nos programas de fertilização pode ser uma alternativa sustentável para a gestão integrada da doença.

Palavras-chave: Severidade, Incidência, Doutor da folha.

Introducción

La producción de fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.) constituye una de las actividades agrícolas de mayor importancia en Ecuador, situándose como un cultivo estratégico para garantizar la seguridad alimentaria y la economía rural del país. Las provincias de Pichincha, Imbabura, Chimborazo, Tungurahua y Manabí son las principales zonas de producción, donde se estima que se cosechan alrededor de 60,000 toneladas anuales, siendo esta leguminosa fundamental para las dietas locales y la subsistencia de muchos agricultores (Enríquez-Estrella & Montenegro-Flores, 2020). Sin embargo, a pesar de su importancia, el cultivo de fréjol enfrenta múltiples desafíos fitosanitarios que afectan su rendimiento y sostenibilidad, destacando entre estos la antracnosis, causada por el hongo *Colletotrichum lindemuthianum*.

La antracnosis representa una de las enfermedades más destructivas del fréjol a nivel mundial y en Ecuador, en particular, donde es considerada como la segunda enfermedad de mayor impacto económico en el cultivo (Tamilmalar et al., 2022). La enfermedad se caracteriza por la aparición de manchas oscuras, hundidas y necróticas en las hojas, tallos y vainas, lo que conduce a la descomposición de los tejidos afectados y una notable reducción en la calidad y cantidad de la cosecha (Eskandari et al., 2020). La rápida propagación en condiciones de alta humedad y temperaturas moderadas favorece su expansión en muchas regiones del Ecuador, haciendo que su control sea un desafío constante para los productores agrícolas (Castillo et al., 2022).

Tradicionalmente, el control de esta enfermedad ha dependido del uso de agroquímicos, principalmente fungicidas sintéticos, cuya efectividad en el corto plazo ha sido comprobada. Sin embargo, estas prácticas presentan varias limitaciones y riesgos asociados. El uso intensivo de productos químicos ha dado lugar a la aparición de cepas resistentes del patógeno, incrementando la dosis necesaria para lograr un control efectivo y, en consecuencia, elevando los costos de producción (Pernía & Sanabria, 2021). Además, la aplicación constante de

agroquímicos ha contribuido a la contaminación ambiental, a la pérdida de biodiversidad, a la degradación del suelo y a riesgos para la salud humana, generando un cuestionamiento sobre la sostenibilidad de estas prácticas en el largo plazo (Nunes et al., 2021).

En respuesta a estas problemáticas, la comunidad científica y los agricultores han comenzado a explorar alternativas basadas en métodos de control más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Entre estas opciones, el uso de fuentes de azufre ha destacado por sus propiedades fungicidas naturales y su papel como micronutriente esencial para las plantas. El azufre ha sido reconocido desde hace tiempo por su capacidad para inhibir el desarrollo de hongos patógenos, incluyendo *C. lindemuthianum*, y por su menor impacto ambiental en comparación con los fungicidas químicos sintéticos (Havlin et al., 2005). Como fungicida natural, el azufre puede alterar las estructuras celulares de los hongos, interfiriendo en procesos vitales y previniendo su proliferación (Schwartz et al., 2005).

Aunque los beneficios del azufre en diferentes sistemas agrícolas están respaldados por diversos estudios, su aplicación específica en cultivos de fréjol todavía no ha sido suficientemente investigada en términos de dosis óptimas, frecuencia de aplicación y efectos en la calidad del producto final y en el equilibrio del ecosistema agrícola (Singh, 1999). La falta de información sistemática limita la adopción generalizada de prácticas basadas en el uso de azufre en este cultivo, lo cual evidencia la necesidad de realizar ensayos controlados que permitan determinar su eficacia, características y posibles impactos. Además, promover el uso racional de esta fuente de azufre puede contribuir a un manejo integrado de plagas y enfermedades, reduciendo la dependencia de productos químicos nocivos y promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles.

El presente estudio surge de la necesidad de explorar y validar el potencial del azufre como una alternativa ecológica y económica para el control de la antracnosis en el cultivo de fréjol. El objetivo general de la investigación es evaluar el efecto del azufre en el control de

Colletotrichum lindemuthianum, determinando la dosis más efectiva y económicamente viable, además de analizar su impacto en el rendimiento agronómico, la calidad de los granos y en la salud del ecosistema agrícola. En este contexto, también es fundamental identificar la dosis de azufre que garantice la mayor protección sin afectar negativamente otros aspectos del cultivo y del entorno, promoviendo así una producción agrícola más responsable y sustentable (Havlin et al., 2005).

Este trabajo resulta de gran relevancia para los productores agrícolas, los técnicos y los investigadores, ya que ofrecerá evidencia científica sobre una alternativa viable para el manejo de una enfermedad que causa pérdidas significativas y requiere, en muchos casos, la aplicación de insumos costosos y dañinos. La adopción de prácticas basadas en el uso de azufre puede representar un avance hacia modelos de agricultura más sostenibles, que integren el control biológico y químico de plagas y enfermedades, pero con menor impacto en el ecosistema y la salud humana. Además, estos conocimientos contribuirán a fortalecer la comercialización y la competitividad del fréjol ecuatoriano en mercados internacionales, promoviendo prácticas más responsables con el ambiente y garantizando la seguridad alimentaria de la población local.

Este estudio evalúa el efecto del azufre en el control de la antracnosis (*Colletotrichum lindemuthianum*) en el cultivo de fréjol (*Phaseolus vulgaris*), con el objetivo de determinar una dosis técnicamente eficiente y económicamente viable. Se aplicaron diferentes concentraciones de azufre, cuantificando su impacto mediante la evaluación del daño foliar (empleando escalas estandarizadas y procesamiento digital de imágenes) y variables agronómicas clave, incluyendo el rendimiento. Mediante un análisis de beneficio-costos, se identificó la dosis óptima que maximiza la rentabilidad. Los resultados aportan evidencia técnica para el manejo integrado de la enfermedad, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles alineadas con principios agroecológicos y de reducción de impacto ambiental. Este enfoque responde a la creciente demanda de sistemas de producción responsables con los ecosistemas.

Metodología

Manejo Agronómico

Tipo de Investigación

La presente investigación corresponde a un estudio de tipo experimental, cuyo objetivo principal fue evaluar el efecto del azufre en el control de la antracnosis causada por *Colletotrichum lindemuthianum* en el cultivo de fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.). Este enfoque experimental permitió manipular las variables independientes (dosis de azufre) y observar su impacto en las variables dependientes relacionadas con la presencia y severidad de la enfermedad, así como aspectos agronómicos de interés.

Ubicación y Características del Área de Estudio

El estudio se desarrolló en el Campus “La María” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, localizado en las coordenadas 79° 29' 54" O y 01° 05' 02" S a una altitud de 66 m.s.n.m. La elección del sitio respondió a su adecuada infraestructura y condiciones favorables para el cultivo de fréjol, además de facilitar la aplicación de tratamientos y la recolección de datos de campo.

Diseño Experimental

Se empleó un diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA), que incluyó seis tratamientos con diferentes dosis de azufre (0, 5, 10, 15, 20 y 25 kg/ha), además de un control sin aplicación de azufre. Cada tratamiento fue replicado en tres bloques para reducir la variabilidad experimental. El esquema del diseño y la estructura del análisis estadístico permitieron realizar análisis de varianza (ANOVA) ($P < 0.05$) para determinar la significancia de las diferencias entre tratamientos. Los datos de ANOVA y de correlación fueron procesados mediante Excel e InfoStat (Di Rienzo et al., 2010).

Preparación del Suelo y Siembra

El suelo se analizó químicamente para determinar los niveles óptimos de nutrientes, permitiendo ajustar la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio mediante curva de extracción de nutrientes (Conforme et al., 2024). Se sembró el fréjol a una distancia de 0.20 m entre plantas y 0.50 m entre hileras, con una densidad de 80 plantas por parcela (100,000 plantas/ha).

Aplicación de Tratamientos

Las dosis de azufre se aplicaron mediante fertilización edáfica en los días 15 y 45 después de la siembra (dds). La fertilización (N-P-K-S) se realizó mediante urea (46-0-0-0), fosfato diamónico (18-46-0-0), muriato de potasio (0-0-60-0) y sulfato de amonio (20.5-0-0-24). Una vez iniciado el ciclo vegetativo, se registraron las condiciones de aplicación y las dosis administradas. El riego se mantuvo a capacidad de campo cuando fue necesario mediante aspersión monitoreándose por una estación climática (Speed Connect WD LTE CAT-4) y un medidor de humedad de suelo (VIVOSUN Digital).

Evaluación de Variables

Severidad de Antracnosis

Se utilizó la escala visual de Lavilla et al. (2022), correlacionada con la evaluación mediante la aplicación Leaf Doctor (Pethybridge, S. J., & Nelson, S. C., 2015), para determinar la incidencia y severidad de la enfermedad en hojas y vainas. La evaluación se realizó en estado de floración en la etapa cercana a la cosecha (R8; 60-70 días después de la siembra).

Cosecha y Variables de Rendimiento

La cosecha se realizó de forma manual al alcanzarse la madurez fisiológica de las vainas, determinada mediante la evaluación visual de cambios en la coloración y textura del pericarpio. Para la cuantificación de parámetros agronómicos, se empleó un calibrador digital (precisión $\pm 0,01$ mm), un flexómetro graduado (precisión $\pm 0,1$ cm) y una balanza analítica

(precisión $\pm 0,01$ g). Las variables evaluadas incluyeron: altura de planta (cm), número de vainas por planta, longitud de vaina (cm), diámetro transversal de vaina (mm), número de granos por vaina y rendimiento por planta (g). Posteriormente, el rendimiento se extrapola a kilogramos por hectárea (kg/ha) mediante un factor de conversión estandarizado, previa eliminación de las plantas correspondientes al efecto borde para minimizar sesgos en la estimación de productividad. Los datos obtenidos fueron procesados estadísticamente para determinar la variabilidad fenotípica entre los individuos muestreados.

Análisis Estadístico

Los datos recogidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la significancia estadística de los efectos del azufre en las variables estudiadas. Se realizaron pruebas de comparación múltiple de Tukey al nivel de significancia del 5% ($\alpha=0.05$), utilizando el software INFOSTAT (2020). Además, se empleó un análisis de correlación para evaluar la relación entre las variables de severidad y otros aspectos evaluados.

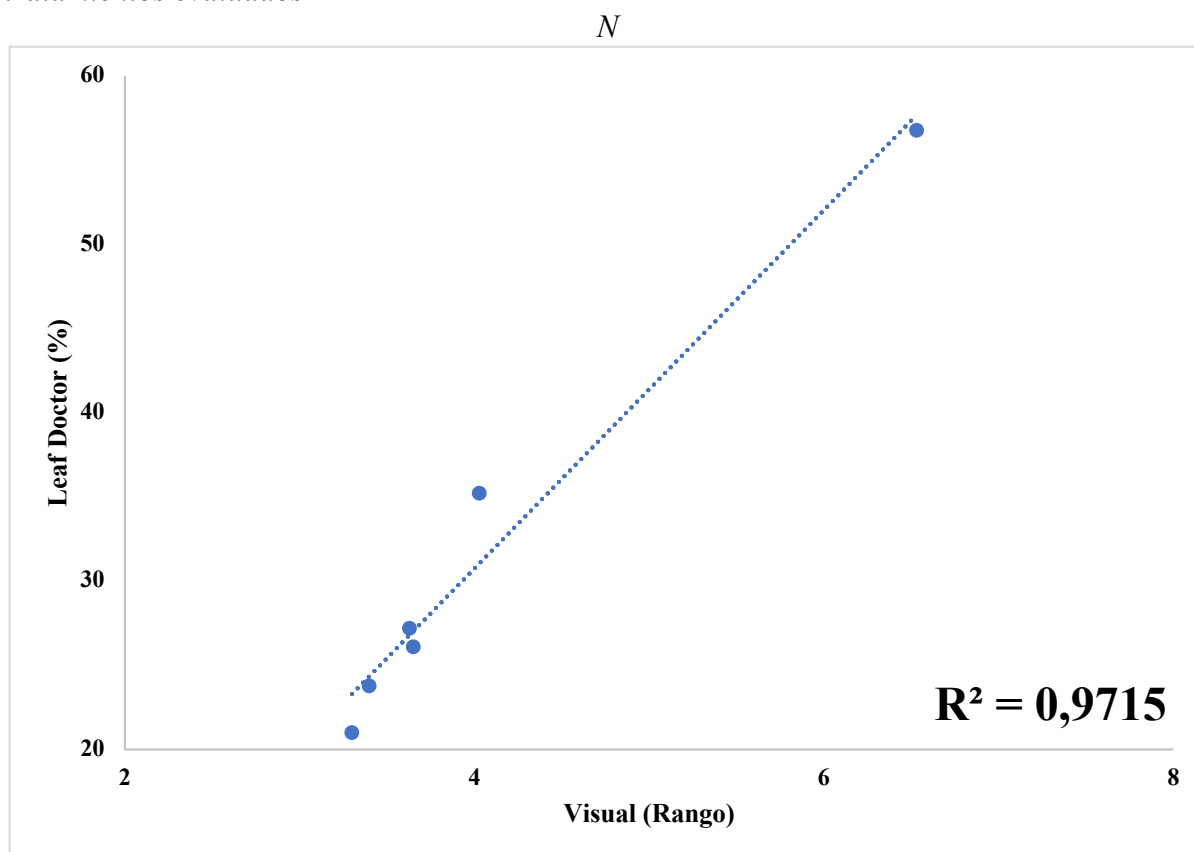
Resultados

Severidad de antracnosis

Los resultados demostraron una correlación altamente significativa entre los métodos de evaluación de severidad de antracnosis, Leaf Doctor y la evaluación visual, con un coeficiente de determinación (R^2) 0.9715 (Figura 1). Esta fuerte correlación indica que ambas metodologías son consistentes para cuantificar el daño causado por *Colletotrichum lindemuthianum* en hojas de fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.).

Figura 1

Correlación entre los métodos de evaluación de severidad de antracnosis en hojas de fréjol (*Phaseolus vulgaris*). Los puntos representan el promedio de datos en los diferentes tratamientos evaluados

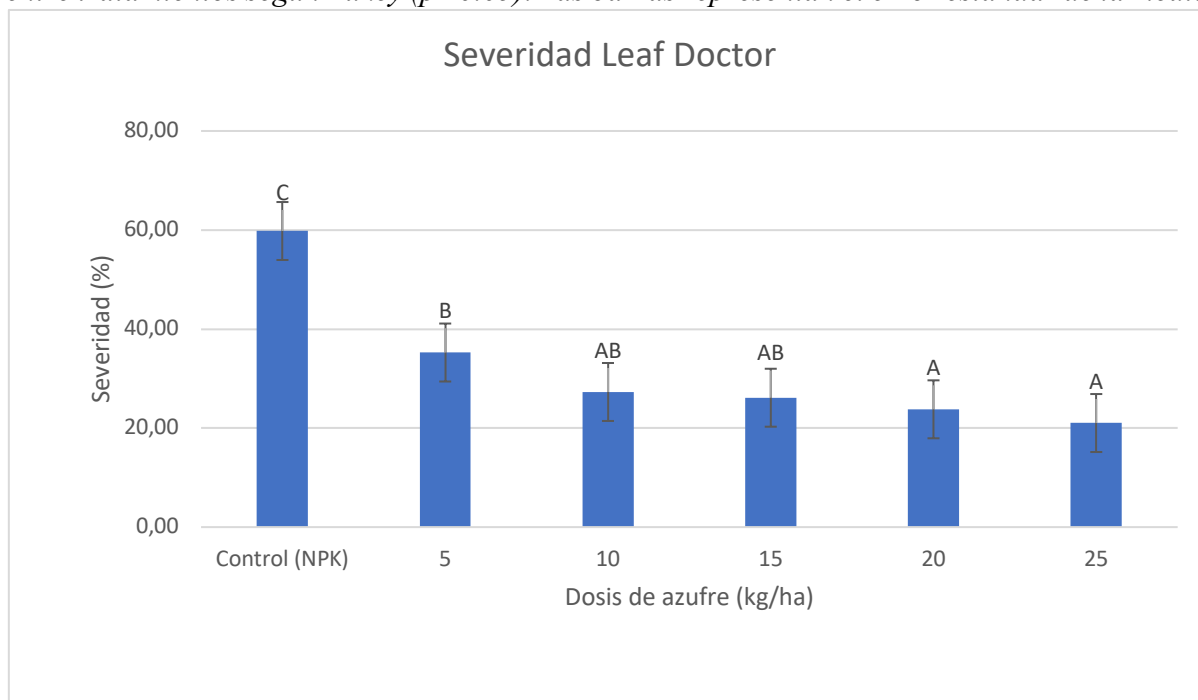


Nota: (Autores, 2025).

En cuanto a la severidad evaluada mediante el procesamiento de imágenes (Leaf Doctor), se observaron diferencias significativas entre los tratamientos con distintas dosis de azufre (ANOVA, $p < 0.05$). Todas las dosis de azufre redujeron significativamente la severidad de la enfermedad comparadas con el control. La aplicación de azufre a 20 y 25 kg/ha tuvieron la mayor reducción de la infección, con valores de 21.02% y 23.69%, respectivamente, en comparación con el control (Figura 2).

Figura 2

Severidad de antracnosis (*Colletotrichum lindemuthianum*) con el método de evaluación de procesamiento de imágenes Leaf Doctor. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos según Tukey ($p < 0.05$). Las barras representan el error estándar de la media

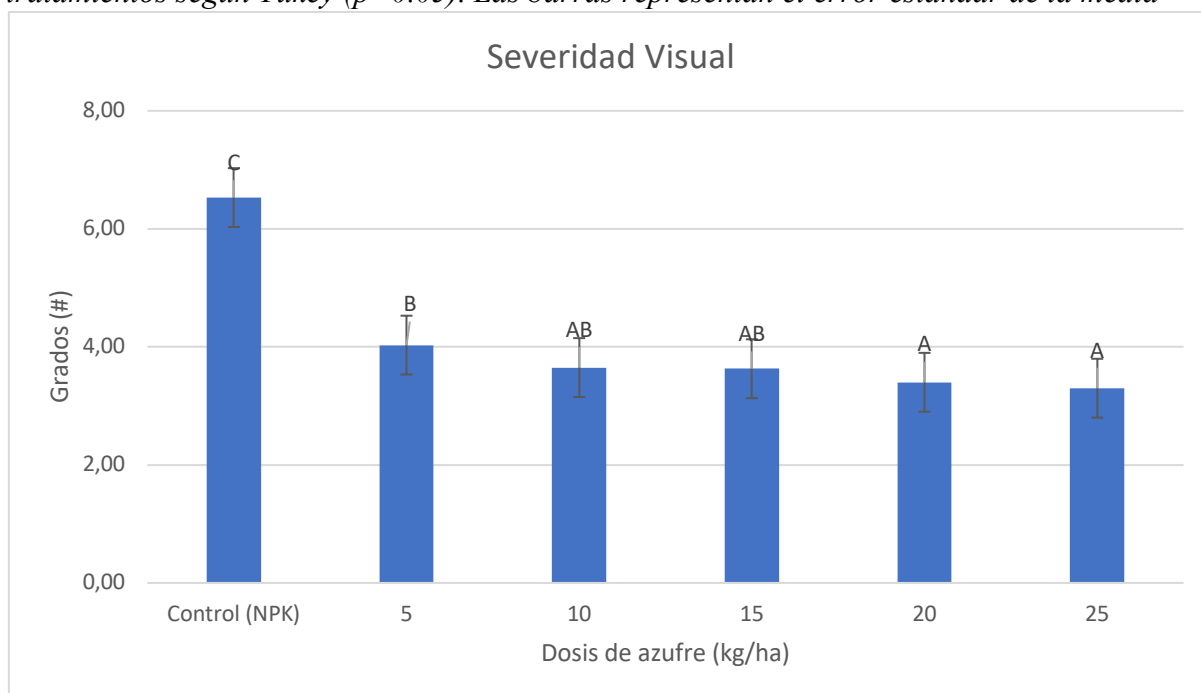


Nota: (Autores, 2025).

La evaluación visual corroboró estos hallazgos, donde la dosis de 20 y 25 kg/ha presentó la menor severidad (3.3 en una escala visual), mientras que el control registró el valor más alto (6.53) (Figura 3). El análisis post hoc de Tukey ($p < 0.05$) confirmó diferencias significativas entre tratamientos, respaldando la eficacia de dosis bajas de azufre en el control de la antracnosis.

Figura 3

Severidad de antracnosis (*Colletotrichum lindemuthianum*) con el método de evaluación escalas de evaluación visuales. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos según Tukey ($p < 0.05$). Las barras representan el error estándar de la media



Nota: (Autores, 2025).

Efecto del azufre sobre las características agronómicas

Los resultados del estudio no mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en las variables agronómicas evaluadas en *Phaseolus vulgaris* L. bajo la aplicación de diferentes dosis de azufre. La altura de planta presentó un promedio de 50.36 cm, con un rango entre 49.04 y 51.16 cm, sin variaciones atribuibles a los tratamientos. De manera similar, el número de vainas por planta (promedio: 6.18; rango: 5.57–6.80), la longitud de vaina (11.70 cm; rango: 11.13–12.08 cm), el diámetro de vaina (1.28 mm; rango: 1.25–1.30 mm), el número de granos por vaina (3.51; rango: 3.40–3.67) y el rendimiento por planta (17.98 g; rango: 14.96–21.26 g) no fueron influenciados significativamente por las dosis de azufre aplicadas. Estos hallazgos sugieren que, bajo las condiciones edafoclimáticas del ensayo, el azufre no actuó como un factor limitante o promotor del desarrollo agronómico del cultivo, lo que indica que su efecto se circunscribió principalmente al control de la antracnosis sin alterar los parámetros morfológicos o productivos del fréjol (Tabla 1).

Tabla 1*Efecto del azufre sobre las características agrónoma del fréjol (Phaseolus vulgaris L.)*

Tratamiento (kg/ha de azufre)	Altura (cm)	Vainas por planta	Longitud (cm)	Dímetro (mm)	Granos por vaina	Rendimiento por planta (g)
Control (NPK)	51.96	5.80	12.04	1.30	3.40	14.96
5	49.53	6.80	11.83	1.28	3.67	15.65
10	49.04	6.13	11.13	1.25	3.50	16.46
15	50.66	6.27	12.08	1.29	3.57	19.62
20	51.16	5.57	11.43	1.29	3.50	19.94
25	49.80	6.53	11.71	1.28	3.40	21.26
Promedio	50.36	6.18	11.70	1.28	3.51	17.98

Nota: (Autores, 2025).

Análisis económico

El tratamiento de 25kg/ha de azufre presentó la mayor rentabilidad, con un rendimiento de 11.24 lb/planta, ingresos de \$18.66 y un beneficio/costo de 0.32 (Tabla 8). Entre los tratamientos con azufre, la dosis de 15 kg/ha mostró la mejor relación beneficio/costo (0.30), alcanzando el 94% de la rentabilidad del control. En contraste, el control fue el menos rentable (42%) comparado con el mejor tratamiento. Estos datos subrayan que es probable que al azufre promueva el rendimiento al tener una menor severidad (Tabla 2). Aunque hay que recalcar que los tratamientos no tuvieron una diferencia significativa a nivel de rendimiento por lo que los beneficios económicos podrían cambiar en diferentes ubicaciones.

Tabla 2*Análisis económico de la aplicación de azufre en el cultivo de fréjol (Phaseolus vulgaris). El precio oficial al momento del ensayo (2025) fue de \$1.66 por kg.*

Tratamiento (kg/ha azufre)	Rendimiento (kg)	Ingresos (\$)	Egresos (\$)	Rentabilidad ad	Beneficio/Costo	Vs Control
Control (NPK)	7.91	13.13	58.36	22.50	0.22	1.00
5	8.27	13.73	58.42	23.50	0.23	1.04
10	8.70	14.44	58.41	24.73	0.25	1.10
15	10.37	17.21	58.40	29.48	0.29	1.31
20	10.54	17.50	58.39	29.96	0.30	1.33
25	11.24	18.66	58.38	31.96	0.32	1.42

Nota: (Autores, 2025).

Discusión

En el presente estudio se evaluó la severidad de la antracnosis en el cultivo de fréjol mediante dos enfoques complementarios: una escala visual basada en observación directa y un análisis digital utilizando la aplicación Leaf Doctor. Se observó una alta correlación entre

ambos métodos, lo que valida el uso de herramientas digitales como apoyo en evaluaciones fitopatológicas. Aplicaciones como Leaf Doctor permiten una cuantificación más objetiva y precisa del daño foliar a través del procesamiento de imágenes, minimizando el sesgo inherente a la percepción humana (Pethybridge y Nelson, 2015). A diferencia de las metodologías visuales convencionales, cuya reproducibilidad puede verse afectada por la variabilidad interobservador, este tipo de herramientas promueve la estandarización y mejora la consistencia de los datos recolectados (Olmstead et al., 2021). Su implementación ha demostrado eficacia al correlacionarse con datos visuales, optimizando los tiempos de diagnóstico y facilitando la toma de decisiones agronómicas (Schröder et al., 2023).

El tratamiento con azufre mostró una reducción significativa en la severidad de la enfermedad en comparación con el control. Desde un enfoque bioquímico y fisiológico, este efecto puede atribuirse a la participación del azufre en la biosíntesis de aminoácidos azufrados como la cisteína y la metionina, esenciales para la formación de proteínas relacionadas con mecanismos de defensa vegetal (Zenda et al., 2021). Además, el azufre interviene en la síntesis de compuestos volátiles como los glucosinolatos, conocidos por su actividad antimicrobiana y su papel en la activación de respuestas inmunes frente a patógenos (Dawar et al., 2023). Asimismo, se ha documentado que este elemento favorece la actividad de enzimas antioxidantes como superóxido dismutasa y catalasa, que contribuyen a la mitigación del estrés oxidativo inducido por infecciones fúngicas (Yu y Jiang, 2023; Cao et al., 2021).

La disminución en la severidad de la antracnosis también podría estar asociada a una mayor acumulación de fitoalexinas y compuestos fenólicos, que fortalecen las barreras estructurales de la planta. Skura et al. (2023) señalan que el azufre influye positivamente en la composición de la cutícula y la pared celular, promoviendo la síntesis de lignina, un polímero estructural que actúa como barrera física contra la penetración de patógenos (Pijnakker et al., 2022). En concordancia, Aghajanzadeh et al. (2019) reportaron que una mayor deposición de

lignina en tejidos infectados limita la propagación de hongos, lo que podría explicar las diferencias observadas en la severidad de la enfermedad en el presente estudio.

Diversos estudios han documentado efectos similares del azufre en otros cultivos. Fernández et al. (2018) reportaron una reducción del 68% en la severidad de *Alternaria solani* en papa tras su aplicación conjunta con bioestimulantes. De manera similar, Zhang et al. (2019) encontraron una disminución del 65% en la severidad de *Botrytis cinerea* en tomate mediante el uso de azufre micronizado. En vid, López y Ramírez (2020) informaron una reducción del 70% en la incidencia de *Plasmopara viticola*, mientras que García et al. (2021) documentaron una disminución del 78% en oídio en pepino, acompañada de un aumento del 15% en el rendimiento. Martínez et al. (2022) señalaron que la combinación de azufre con aceite vegetal redujo la severidad de la roya en trigo en un 60%.

No se observaron efectos significativos del azufre sobre variables agronómicas como altura de planta, longitud y número de vainas, número de granos por vaina ni rendimiento. Esto sugiere que, bajo las condiciones edafoclimáticas del experimento, el azufre no actuó como factor limitante ni promotor del crecimiento estructural (Tabak et al., 2020). Este resultado podría estar relacionado con la baja influencia del azufre sobre la regulación de fitohormonas como auxinas y giberelinas, las cuales están implicadas en procesos de elongación celular (Honsel et al., 2012). Aun así, algunos estudios proponen que estas interacciones hormonales pueden favorecer el desarrollo de órganos reproductivos, como vainas más largas (Wu et al., 2021).

Desde el punto de vista económico, el tratamiento de 25kg/ha superó al control en términos de rentabilidad. Hay que recalcar que al no existir una diferencia significativa en el rendimiento de los tratamientos estos resultados pueden cambiar en diferentes locaciones. No obstante, el aporte del azufre en parámetros fisiológicos clave puede tener implicaciones a largo plazo, especialmente considerando su rol en la eficiencia del uso de nutrientes y la fijación

biológica de nitrógeno en leguminosas (Liu et al., 2024). Es importante enfatizar que la aplicación excesiva de azufre no necesariamente mejora el control de enfermedades y puede inducir efectos adversos (Abadie y Tcherkez, 2019).

En síntesis, los hallazgos del presente estudio coinciden con trabajos previos que destacan el papel multifuncional del azufre en la defensa vegetal y en ciertos aspectos del desarrollo morfológico. No obstante, también se evidencia la necesidad de una aplicación estratégica, considerando las complejas interacciones del azufre con el sistema suelo-planta-atmósfera. Como alternativa sostenible a fungicidas sintéticos, el azufre podría integrarse en programas de manejo integrado de enfermedades, complementándose con otros elementos como silicio y calcio, que también han demostrado eficacia en la supresión de patógenos fúngicos (Conforme et al., 2024; Guerra-Fernández y Herrera-Eguez, 2022).

Conclusión

Los resultados de este estudio demuestran que la aplicación de azufre a una dosis de 25 kg/ha reduce significativamente la severidad de la antracnosis en el cultivo de fréjol, respaldado por la alta correlación entre los métodos de evaluación (Leaf Doctor y escalas visuales). Aunque no se observaron cambios notables en la mayoría de los parámetros agronómicos, el incremento del 10% en el rendimiento sugiere un beneficio económico adicional. Estos hallazgos posicionan al azufre como una alternativa sostenible y eficaz para el manejo integrado de la enfermedad, ofreciendo una solución viable para reducir la dependencia de fungicidas sintéticos y promover prácticas agrícolas más respetuosas con el medio ambiente.

Referencias bibliográficas

- Abadie, C., & Tcherkez, G. (2019). *Plant sulphur metabolism is stimulated by photorespiration*. *Communications Biology*, 2(1), Article 61. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0616-y>

- Aghajanzadeh, A., Reich, M., Hawkesford, M. J., & Burow, M. (2019). *Sulfur metabolism in Allium cepa is hardly affected by chloride and sulfate salinity*. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(7), 941–955. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1540037>
- Cao, X., Wang, C., Luo, X., Yue, L., White, C., Elmer, W., Dhankher, P., Wang, Z., & Xing, B. (2021). *Elemental sulfur nanoparticles enhance disease resistance in tomatoes*. *ACS Nano*, 15(7), 12143–12156. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c02917>
- Castillo, M., Miller, S., & Stewart, J. (2022). *Colletotrichum spp. and other fungi associated with anthracnose on Coffea arabica L. in Mérida State, Venezuela*. *Summa Phytopathologica*, 48(2), 99–111.
- Conforme, N. (2021). *Evaluación de la severidad de antracnosis (Colletotrichum lindemuthianum) en el cultivo de fréjol (Phaseolus vulgaris L.) var. Cuarentón bajo el efecto de la aplicación de silicio* [Tesis de grado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/items/2e10fbbe-897a-4a94-8555-bdc219d53e77>
- Dawar, R., Karan, S., Bhardwaj, S., Meena, K., Padhan, R., Reddy, S., & Bana, S. (2023). *Role of sulphur fertilization in legume crops: A comprehensive review*. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(21), 87–101. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i214033>
- Enríquez-Estrella, Á., & Montenegro-Flores, I. (2020). *Análisis de caso del modelo de gestión asociativo a nivel rural en acopio de fréjol*. *Economía y Negocios*, 11(1), 34–46.
- Eskandari, S., Höfte, H., & Zhang, T. (2020). *Foliar manganese spray induces the resistance of cucumber to Colletotrichum lagenarium*. *Journal of Plant Physiology*, 246, 153129. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153129>
- Fernández, A., Gutiérrez, M., & Chávez, D. (2018). *Efecto del azufre y bioestimulantes sobre Alternaria solani en papa (Solanum tuberosum L.)*. *Revista de Fitopatología*, 53(4), 287–294.
- García, C., López, F., & Hernández, J. (2021). *Eficacia del azufre en el control de oídio (Podosphaera xanthii) en pepino (Cucumis sativus L.)*. *Agronomía Tropical*, 71(2), 115–123.
- Guerra-Fernández, W.D y Herrera-Eguez, F.E. 2022. *Polisulfuro de calcio en el manejo fitosanitario del cultivo de cacao CCN-51*”. Ediciones GESICAP, Ecuador, 55 pp. <https://repositorio.uteq.edu.ec/items/1ebb9d26-c00a-4259-aa39-ccbfe643bd86>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2005). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (7th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Honsel, A., Kojima, M., Haas, R., Frank, W., Sakakibara, H., Herschbach, C., & Rennenberg, H. (2012). *Sulphur limitation and early sulphur deficiency responses in poplar: Significance of gene expression, metabolites, and plant hormones*. *Journal of Experimental Botany*, 63(5), 1873–1886. <https://doi.org/10.1093/jxb/err365>
- Lavilla, M., Ivancovich, A., & Díaz-Paleo, A. (2022). *Diagrammatic scale for assessing the severity of Cercospora leaf blight on soybean (Glycine max) leaflets*. *Agronomía Mesoamericana*, 33(2), 455–467.
- Liu, H., Dai, Z., Wang, Y., Ma, X., Shi, Z., Wang, R., Xu, Z., Li, H., Han, X., & Jiang, Y.

- (2024). *Interacting effects of water and nitrogen addition on soil–plant sulfur dynamics in a semi-arid grassland*. *Geoderma*, 442, 116796. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116796>
- López, R., & Ramírez, J. (2020). *Efectividad de diferentes dosis de azufre en el control de Plasmopara viticola en vid (Vitis vinifera L.)*. *Revista Vitivinícola Latinoamericana*, 33(1), 55–62.
- Martínez, L., Paredes, J., & Soto, R. (2022). *Control de roya en trigo mediante la aplicación de azufre y aceite vegetal*. *Ciencia y Agricultura*, 19(2), 142–149.
- Nunes, A., Gonçalves-Vidigal, C., Martins, R., Xavier, S., Valentini, G., Vaz Bisneta, M., & Vidigal Filho, S. (2021). *Relationship of Colletotrichum lindemuthianum races and resistance loci in the Phaseolus vulgaris L. genome*. *Crop Science*, 61(6), 3877–3893.
- Olmstead, J. W., Vincent, L. M., & Harmon, P. F. (2021). *Evaluation of image-based disease severity assessments in plant pathology*. *Plant Disease*, 105(3), 567–574. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-20-1249-RE>
- Pernía, C., & Sanabria, E. (2021). *El manejo integral de plagas y enfermedades en cultivos como una alternativa sostenible*. *Dissertare Revista de Investigación en Ciencias Sociales*, 6(1), 1–21.
- Pethybridge, S. J., & Nelson, S. C. (2015). *Leaf Doctor: Quantitative severity assessment of foliar plant diseases*. *Plant Disease*, 99(10), 1310–1315. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0319-RE>
- Pijnakker, J., Moerkens, R., Vangansbeke, D., Duarte, M., Bellinkx, S., Benavente, A., Merckx, J., Stevens, I., & Wäckers, F. (2022). *Dual protection: A tydeoid mite effectively controls both a problem pest and a key pathogen in tomato*. *Pest Management Science*, 78(1), 42–51. <https://doi.org/10.1002/ps.6647>
- Schröder, M., Becker, R., & Hoffmann, A. (2023). *Aplicaciones digitales en fitopatología: Avances y desafíos*. *Journal of Agricultural Technology*, 44(2), 215–229.
- Schwartz, H. F., Gent, D. H., & Franc, G. D. (2005). *Compendium of bean diseases (2nd ed.)*. *American Phytopathological Society*.
- Singh, S. P. (1999). *Production and utilization*. *Common bean improvement in the twenty-first century*, 1-24.
- Skura, E., Koto, R., Lika, E., Shahini, S., & Sallaku, F. (2023). *Comparative characteristics of plant protection against copper and sulphur influence*. *Scientific Horizons*, 26(1), 52–61. <https://doi.org/10.48077/scihor.26%281%29.2023.52-61>
- Tabak, M., Lisowska, A., & Filipek-Mazur, B. (2020). *Bioavailability of sulfur from waste obtained during biogas desulfurization and the effect of sulfur on soil acidity and biological activity*. *Processes*, 8(7), 863. <https://doi.org/10.3390/pr8070863>
- Tamilmalar, P., Sheela, J., Rajinimala, N., Sabarinathan, G., & Ebenezer, B. (2022). *Survey, isolation and pathogenicity on cucumber anthracnose caused by Colletotrichum lagenarium in Tamil Nadu*. *The Pharma Innovation Journal*, 11, 3674–3680.
- Wu, Y., Kwak, J. H., Karst, J., Ni, M., Yan, Y., Lv, X., Xu, J., & Chang, S. X. (2021). *Long-term nitrogen and sulfur deposition increased root-associated pathogen diversity in a boreal forest*. *Soil Biology and Biochemistry*, 155, 108163.

<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108163>

- Yu, J., & Jiang, X. (2023). *Synthesis and perspective of organosulfur chemicals in agrochemicals*. *Advanced Agrochem*, 2(1), 100015. <https://doi.org/10.1016/j.aac.2022.12.003>
- Zenda, T., Liu, S., Dong, A., & Duan, H. (2021). *Revisiting sulphur—the once neglected nutrient: Its roles in plant growth, metabolism, stress tolerance and crop production*. *Agriculture*, 11(7), 626. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070626>
- Zhang, L., Chen, W., & Zhao, Y. (2019). *Efecto del azufre micronizado en el control de Botrytis cinerea en tomate (Solanum lycopersicum L.)*. *Horticultura Internacional*, 39(3), 191–198.