

Efecto de la zeolita y dosis de fósforo en el manejo de la mancha de asfalto y productividad del maíz

Effect of zeolite and phosphorus rates on tar spot management and maize productivity

Efeito das doses de zeólito e fósforo no controlo da mancha de alcatrão e na produtividade do milho

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



Eguez-Enríquez, Erick Alberto
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
eequez@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-7071-4645>



Ramírez-Montesdeoca, Wilson Andrés
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
wramirezm@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0008-5785-6789>



Gorozabel-Andrade, Angelica Johanna
Asociación de Exportadores de Banano del Ecuador (AEBE)
angelica.gorozabel09@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0000-5055-0009>



Macay-Moreira, John Jairo
Investigador Independiente
johnmacay27@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0009-0538-6153>



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v7/n1/1567>

Como citar:

Herrera-Eguez, F. E., Eguez-Enríquez, E. A., Ramírez-Montesdeoca, W. A., Gorozabel-Andrade, A. J., & Macay-Moreira, J. J. (2026). Efecto de la zeolita y dosis de fósforo en el manejo de la mancha de asfalto y productividad del maíz. *Código Científico Revista De Investigación*, 7(1), 2652–2667.

Recibido: 26/05/2026

Aceptado: 25/06/2026

Publicado: 30/06/2026

Resumen

El cultivo de maíz enfrenta limitaciones productivas debido a la mancha de asfalto causada por *Phyllachora maydis*, lo que demanda alternativas sostenibles de manejo. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes dosis de fósforo en combinación con zeolita sobre la severidad de la enfermedad, variables agronómicas y rentabilidad del cultivo. Se estableció un experimento en campo bajo un diseño de bloques completos al azar con cinco tratamientos y tres repeticiones. La severidad fue evaluada mediante escala visual y análisis digital de imágenes. Los resultados mostraron una alta correlación entre ambos métodos, evidenciando la confiabilidad del análisis digital. El tratamiento con 75 kg ha⁻¹ de fósforo más zeolita redujo significativamente la severidad de la enfermedad. Aunque no se observaron diferencias estadísticas en rendimiento, la combinación de fósforo y zeolita mejoró características morfológicas de la mazorca. El análisis económico indicó que la reducción de fósforo con zeolita mantiene la rentabilidad. Se concluye que la zeolita constituye una alternativa viable para optimizar la fertilización y contribuir al manejo sostenible de la enfermedad.

Palabras clave: eficiencia, fertilización, económico, Leaf Doctor, evaluación.

Abstract

Maize production is constrained by tar spot caused by *Phyllachora maydis*, highlighting the need for sustainable management strategies. This study aimed to evaluate the effect of different phosphorus rates combined with zeolite on disease severity, agronomic traits, and economic performance. A field experiment was conducted using a randomized complete block design with five treatments and three replications. Disease severity was assessed using both visual scales and digital image analysis. Results showed a strong correlation between methods, confirming the reliability of digital assessment. The treatment with 75 kg ha⁻¹ of phosphorus plus zeolite significantly reduced disease severity. Although no significant differences were observed in yield, the combination improved ear morphological traits. Economic analysis indicated that reduced phosphorus rates with zeolite-maintained profitability. These findings suggest that zeolite is a viable strategy to enhance nutrient efficiency and support sustainable management of tar spot in maize.

Keywords: efficiency, fertilization, income, Leaf Doctor, rating.

Resumo

O cultivo do milho enfrenta limitações produtivas devido à mancha de asfalto causada por *Phyllachora maydis*, o que exige alternativas sustentáveis de gestão. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes doses de fósforo, em combinação com zeólita, sobre a gravidade da doença, as variáveis agronômicas e a rentabilidade da cultura. Foi realizado um ensaio de campo com um delineamento de blocos completos aleatórios, com cinco tratamentos e três repetições. A gravidade foi avaliada através de uma escala visual e de análise digital de imagens. Os resultados revelaram uma elevada correlação entre ambos os métodos, comprovando a fiabilidade da análise digital. O tratamento com 75 kg ha⁻¹ de fósforo mais zeólita reduziu significativamente a gravidade da doença. Embora não tenham sido observadas diferenças estatísticas no rendimento, a combinação de fósforo e zeólita melhorou as características morfológicas da espiga. A análise econômica indicou que a redução do fósforo com zeólita mantém a rentabilidade. Conclui-se que a zeólita constitui uma alternativa viável para otimizar a fertilização e contribuir para a gestão sustentável da doença.

Palavras-chave: eficiência, fertilização, rendimento, Leaf Doctor, classificação.

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es un cultivo de gran relevancia histórica y cultural, cuya domesticación se remonta a más de 5,000 años en Mesoamérica (Carrillo, 2009). Actualmente, representa un pilar fundamental para la seguridad alimentaria y la nutrición global (FAO, 2023). En países como Ecuador, la superficie sembrada de maíz amarillo duro es significativa tanto en ciclos de invierno como de verano (Jiménez et al., 2015). Sin embargo, la productividad de este cereal se ve seriamente comprometida por el ataque de diversos agentes patógenos, entre los cuales destaca la mancha de asfalto (Vinces-Tachong et al., 2022).

Esta patología es una enfermedad foliar provocada primordialmente por el hongo ascomiceto *Phyllachora maydis* Maubl. (Bajet et al., 1994; Kleczewski et al., 2020). Aunque el patógeno es endémico de América Latina, su identificación formal ocurrió en México en 1904 (Maublanc, 1904). La infección se manifiesta mediante estromas negros y brillantes en las hojas que reducen la capacidad fotosintética, lo que disminuye drásticamente el rendimiento y, en ataques severos, puede causar la muerte prematura de la planta (Bajet et al., 1994; Hernández & Sandoval, 2015). En la región latinoamericana, se han documentado pérdidas de rendimiento de hasta el 46% debido a esta enfermedad (Hock et al., 1989; Pereyda-Hernández et al., 2009). Tradicionalmente, el manejo de fitopatógenos en el maíz se ha basado en el uso intensivo de fungicidas sintéticos; no obstante, esta práctica presenta limitaciones crecientes, como el desarrollo de resistencia en las poblaciones de hongos y un impacto ambiental negativo considerable (Cruz, 2013; Nunes et al., 2021). Ante este escenario, la comunidad científica ha volcado su interés hacia alternativas sostenibles basadas en la nutrición mineral para inducir resistencia en los cultivos (Zagar et al., 2019). Estrategias que involucran elementos como el silicio y el azufre han demostrado ser eficaces para fortalecer las barreras estructurales de las plantas y mitigar el daño foliar (Avellaneda-Vázquez & Herrera-Egüez, 2024; Bermeo-Toledo et al., 2025).

En este contexto, el uso de la zeolita surge como una herramienta prometedora para optimizar la sanidad vegetal. Las zeolitas son aluminosilicatos naturales que se han empleado en la agricultura desde la década de 1960, principalmente en Japón y Estados Unidos (Pazmiño-Muñoz et al., 2023). Debido a su alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) y su estructura porosa, funcionan como acondicionadores de suelo y portadores de nutrientes de liberación lenta, mejorando la eficiencia de la fertilización (Ramesh & Reddy, 2011; Selva-Preetha & Balakrishnan, 2017). Investigaciones recientes en otros cultivos, como el fréjol (*Phaseolus vulgaris*), han documentado que el uso de aluminosilicatos como la clinoptilolita está directamente relacionado con una menor incidencia de enfermedades fúngicas, actuando como un agente protector y optimizador del vigor de la planta (Pazmiño-Muñoz et al., 2023). Por lo tanto, la integración de zeolitas en el manejo nutricional del maíz podría potenciar la resiliencia del cultivo frente al complejo de la mancha de asfalto, promoviendo una producción más eficiente y ecológica.

El presente estudio tiene como objetivo general evaluar los efectos del fósforo y la zeolita sobre el control de la mancha de asfalto, considerando tanto la respuesta fisiológica y agronómica del cultivo como la eficiencia económica de los tratamientos aplicados. Para ello, se plantean tres objetivos específicos: determinar las características agronómicas del maíz bajo la aplicación de cinco dosis de fósforo en combinación con zeolitas; evaluar la severidad de la mancha de asfalto en función de dichos tratamientos, considerando el papel de zeolita como liberador de nutrientes; y efectuar un análisis económico del rendimiento obtenido en relación con los costos de fertilización. Este enfoque integral permitirá valorar la interacción entre nutrición mineral, control fitosanitario y sostenibilidad económica en la producción de maíz.

Metodología

Localización del estudio

La investigación se llevó a cabo bajo condiciones de campo en la Finca Experimental "La María" de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), ubicada en el km 7.5 de la vía Quevedo–Mocache, provincia de Los Ríos, a 79°32' de longitud oeste y 1°04' de latitud sur, con una altitud de 75 m s. n. m. El sitio presenta condiciones agroclimáticas propias del bosque húmedo tropical, con temperatura media anual de 24.9 °C, humedad relativa promedio de 84 %, precipitación anual de 2 295 mm, heliofanía de 870.2 h año⁻¹ y evaporación media de 999 mm. Estas condiciones resultan favorables tanto para el desarrollo del cultivo de maíz como para la incidencia y progresión de enfermedades foliares, particularmente la mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*), cuya esporulación y dispersión se ven favorecidas por alta humedad relativa y temperaturas entre 15 y 25 °C (Kleczewski et al., 2020).

Material vegetal

Se empleó el híbrido de maíz (*Zea mays* L.) H-551 perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), seleccionado por su potencial de rendimiento, ciclo vegetativo de aproximadamente 115 días, altura promedio de planta de 2.32 m y tolerancia moderada a enfermedades foliares como la mancha de asfalto. La elección de material híbrido obedece a su mayor uniformidad genética y estabilidad agronómica frente a condiciones ambientales adversas, características que favorecen una respuesta homogénea a los tratamientos de fertilización y manejo fitosanitario evaluados. Adicionalmente, el híbrido seleccionado es representativo de la zona y se encuentra mejorado genéticamente para adaptarse a las condiciones climáticas de la misma.

Factores en estudio, tratamientos y diseño experimental

El estudio evaluó el efecto de diferentes dosis de fósforo (P) en combinación con zeolita comercial (ZeoterA) sobre variables agronómicas, patológicas y económicas del cultivo de

maíz. Se establecieron cinco tratamientos: T1 = 150 kg ha⁻¹ de P (testigo absoluto sin zeolita); T2 = 125 kg ha⁻¹ de P + 50 kg ha⁻¹ de ZeoterA; T3 = 100 kg ha⁻¹ de P + 50 kg ha⁻¹ de ZeoterA; T4 = 75 kg ha⁻¹ de P + 50 kg ha⁻¹ de ZeoterA; y T5 = 50 kg ha⁻¹ de P + 50 kg ha⁻¹ de ZeoterA. Todos los tratamientos recibieron una fertilización base uniforme de 200 kg ha⁻¹ de nitrógeno (N) y 150 kg ha⁻¹ de potasio (K), fuentes consideradas esenciales para el crecimiento y desarrollo del cultivo. La incorporación de zeolita se sustenta en su elevada capacidad de intercambio catiónico, la cual favorece la retención y liberación gradual de nutrientes, mejorando la eficiencia de la fertilización fosfórica en suelos con alta capacidad de fijación (Mengutay et al., 2013). El diseño experimental empleado fue un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con cinco tratamientos y tres repeticiones, totalizando 15 unidades experimentales. Cada parcela tuvo un área total de 16 m² (4 m × 4 m) y un área útil de 6.4 m², con distanciamiento de 0.80 m entre hileras y 0.30 m entre plantas, depositando una semilla por sitio de siembra.

Manejo agronómico

La preparación del terreno incluyó limpieza manual de residuos vegetales y dos pases de rastra en sentidos cruzados, con el fin de favorecer la aireación del suelo y el desarrollo radicular. La siembra se realizó manualmente conforme a las distancias indicadas. La fertilización se fraccionó en dos aplicaciones iguales a los 20 y 40 días después de la siembra (DDS), estrategia que permite optimizar la eficiencia de absorción de nutrientes, especialmente del fósforo, cuya disponibilidad en el suelo es limitada por procesos de fijación y baja solubilidad. El control de malezas se realizó mediante la aplicación de glifosato (2.5 L ha⁻¹) y nicosulfurón (40 g ha⁻¹) en preemergencia, complementado con deshierbe manual en estadios tempranos del cultivo. Para el manejo de insectos plaga se efectuaron dos aplicaciones del insecticida Radiant® (spintoram) a dosis de 100 mL ha⁻¹, a los 20 y 50 DDS, ante la detección de *Spodoptera frugiperda*. La cosecha se realizó manualmente al alcanzar la madurez

fisiológica del cultivo, recolectando únicamente las mazorcas provenientes del área útil de cada unidad experimental para evitar el efecto de borde.

Variables agronómicas

La altura de planta se registró en 10 plantas por parcela a los 90 DDS, midiendo desde la base del tallo hasta el ápice de la panoja con un flexómetro graduado. La longitud de mazorca se determinó desde la base hasta el ápice en 10 mazorcas seleccionadas al azar por parcela, empleando cinta métrica, mientras que el diámetro de mazorca se midió en el punto medio de cada mazorca con un calibrador digital. El rendimiento se obtuvo a partir del peso total de mazorcas cosechadas en el área útil de cada parcela, extrapolado posteriormente a kg ha^{-1} y ajustado al 14 % de humedad estándar.

Severidad de la mancha de asfalto

La severidad de *Phyllachora maydis* se cuantificó mediante dos métodos complementarios: una escala visual diagramática de daño foliar de siete categorías (Clase 0: 0 % sin síntomas; Clase 1: 1–6 % con escasas manchas; Clase 2: 7–22 % con necrosis incipiente; Clase 3: 23–55 % con pérdida moderada de área foliar; Clase 4: 56–84 % con necrosis avanzada; Clase 5: 85–95 % con hoja casi destruida; Clase 6: 96–100 % con hoja completamente necrosada) (Hernández y Sandoval, 2015), y el software de análisis de imágenes Leaf Doctor para la estimación porcentual del área afectada (Pethybridge & Nelson, 2015). Las evaluaciones se realizaron en hojas de tres estratos de la planta: inferior (nodo –2), medio (nodo –1) y superior (nodo +1), tomando como referencia el nodo de inserción de la mazorca principal. Esta metodología permite caracterizar el patrón de avance ascendente del patógeno, cuya diseminación ocurre principalmente por viento y salpicadura de lluvia, con mayor severidad bajo condiciones de alta humedad relativa y temperaturas entre 17 y 22 °C.

Análisis estadístico y económico

Los datos obtenidos se procesaron mediante análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), previa verificación de los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homocedasticidad (Levene), utilizando el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2010). Adicionalmente, se realizó un análisis económico mediante el cálculo de la relación beneficio/costo (B/C), considerando los ingresos brutos por venta de grano al precio vigente durante el periodo del ensayo, frente a los costos totales de producción por tratamiento (insumos, mano de obra y equipos).

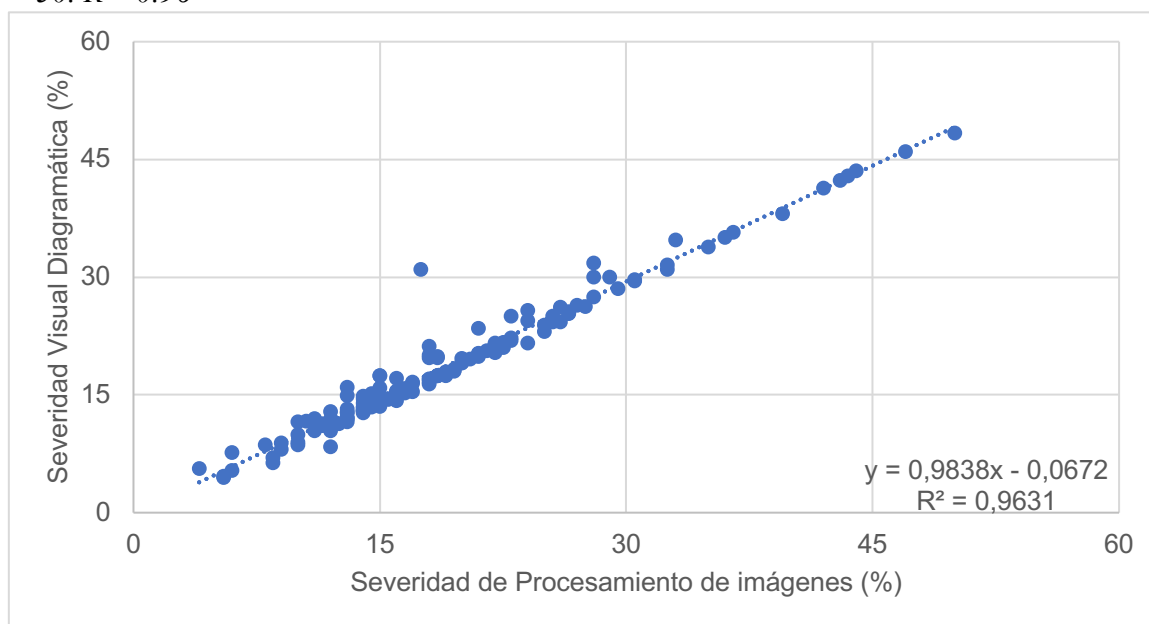
Resultados

Evaluación de la severidad de la mancha de asfalto en el cultivo de maíz mediante escala visual y análisis digital con Leaf Doctor

La severidad de la mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*) fue evaluada utilizando dos metodologías complementarias: la escala visual tradicional de evaluación de enfermedades y el procesador de imágenes Leaf Doctor. El análisis de correlación entre ambas técnicas mostró una relación altamente significativa, con un coeficiente de determinación $R^2=0.96$ (Figura 1). Este hallazgo confirma la robustez del método digital y su capacidad para reproducir con gran precisión las estimaciones realizadas por los evaluadores.

Figura 1

Correlación de la severidad de la mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*) en hojas de maíz evaluada mediante escalas diagramáticas y procesamiento digital de imágenes (Leaf Doctor), $n = 50$. $R^2=0.96$



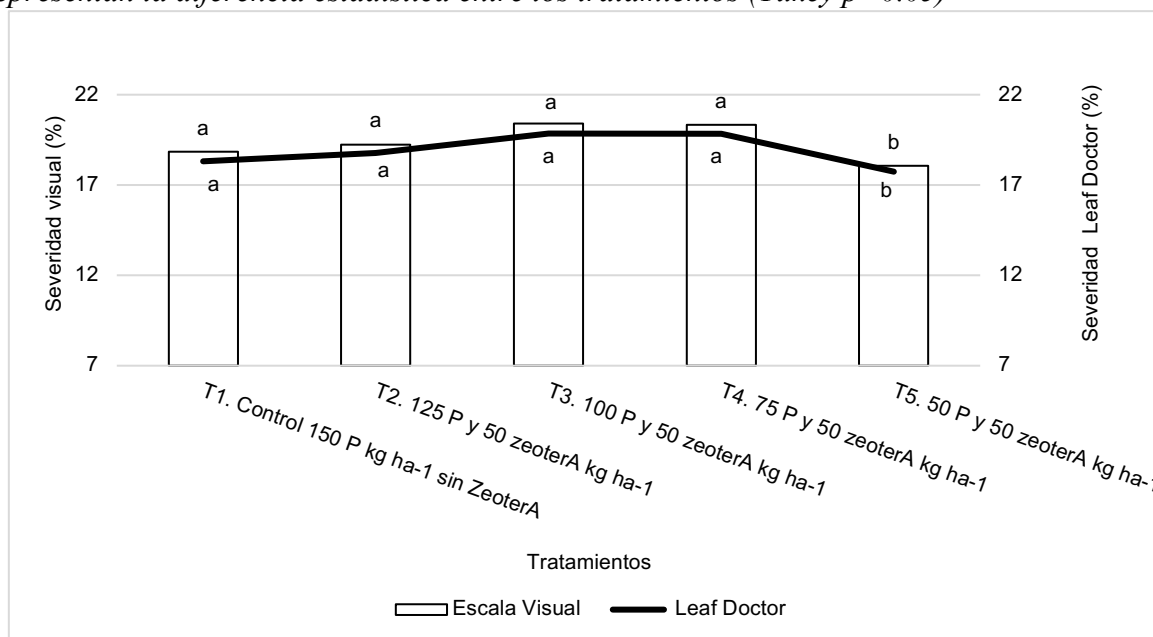
Nota: (Autores, 2026).

La evaluación de la enfermedad se realizó en hojas de diferente altura dentro de la planta tomando como referencia la hoja de inserción de la mazorca (hoja 0); lo que permitió verificar la consistencia de ambos métodos a lo largo del perfil foliar. El análisis de varianza indicó que no existen diferencias estadísticas significativas entre la escala diagramática o el procesamiento de imágenes, lo que sugiere que el uso de herramientas digitales puede complementar y eventualmente sustituir la evaluación visual en estudios de campo, reduciendo sesgos asociados a la subjetividad del observador.

En cuanto a los tratamientos, se observó que la combinación de 75 kg. ha^{-1} de fósforo en combinación con 50 kg. ha^{-1} de zeolita presentó el menor porcentaje de severidad, lo que lo posiciona como una alternativa prometedora para la mitigación de la enfermedad (Figura 2).

Figura 2

Evaluación de la severidad de la mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*) en hojas de diferente altura usando el método de escalas visuales diagramáticas y el programa de procesamiento de imágenes Leaf Doctor. Las barras representan la desviación estándar y las letras representan la diferencia estadística entre los tratamientos (Tukey $p < 0.05$)



Nota: (Autores, 2026).

Efectos de la aplicación de fósforo en combinación con ZeoterA sobre características agronómicas del maíz

La aplicación de diferentes dosis de fósforo en combinación con ZeoterA mostró efectos diferenciados sobre las características agronómicas del cultivo. En términos de altura de planta y peso de diez mazorcas recolectadas, no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, lo que sugiere que la variación en la dosis de fósforo y la inclusión de ZeoterA no afectaron de manera sustancial estos parámetros. Sin embargo, se observaron diferencias en la longitud y diámetro de las mazorcas. El tratamiento 2 (125 kg P ha⁻¹ + 50 kg ZeoterA ha⁻¹) fue estadísticamente superior en longitud, mientras que el diámetro mostró una tendencia favorable en este mismo tratamiento, aunque sin diferir significativamente del control. En términos de rendimiento, el tratamiento 2 alcanzó un valor numéricamente mayor (9162.67 g), aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas (Tabla 1). Estos resultados sugieren que la combinación de fósforo con ZeoterA

podría mejorar ciertos atributos morfológicos de la mazorca, aunque su impacto en el rendimiento global requiere mayor validación.

Tabla 1

Evaluación de las características agronómicas y rendimiento bajo la aplicación de cinco distintas dosis de fósforo en combinación con ZeoterA. Las letras diferentes indican diferencia estadística entre los tratamientos (Tukey $p < 0.05$).

Tratamiento (kg. ha ⁻¹) Dosis de fósforo + 50 kg. ha ⁻¹ de zeolita	Altura planta (m)	Longitud mazorca (cm)	Diámetro mazorca (cm)	Peso mazorca (g)
Control NPK (200-150-150)	2.04 a	16.60 ab	4.53 b	189.67 a
125 P	2.07 a	16.98 b	4.56 b	184.53 a
100 P	2.07 a	15.90 ab	4.42 ab	183.10 a
75 P	2.02 a	15.64 a	4.27 a	179.53 a
50 P	2.05 a	15.39 a	4.23 a	178.83 a

Nota: (Autores, 2026).

Análisis del rendimiento y relación beneficio/costo de los distintos tratamientos

El análisis económico complementó la evaluación agronómica, permitiendo valorar la eficiencia de cada tratamiento en términos de rendimiento y relación beneficio/costo (B/C). En la Tabla 2 se observa que, aunque no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, el control (150 kg P ha⁻¹ sin ZeoterA) alcanzó el menor rendimiento (58.50 kg) y la relación B/C más baja (1.48). Este resultado, aunque numéricamente superior, debe interpretarse con cautela, ya que la inclusión de ZeoterA en dosis reducidas de fósforo mostró rendimientos similares, lo que podría representar una estrategia más sostenible en términos de manejo de fertilización en caso de una subida en el precio de los fertilizantes fosforados.

Tabla 2

Análisis beneficio/costo (B/C) de los tratamientos utilizados en el presente ensayo. El precio del maíz oficial a la fecha fue de \$0.23 por libra

Tratamiento (kg. ha ⁻¹) Dosis de fósforo + 50 kg. ha ⁻¹ de zeolita	Rendimiento (kg. tratamiento)	Ingreso s (\$)	Relación Beneficio/Cos to	Comparado con el control
Control	58.50	13.46	1.48	1.00
125 P	58.42	13.44	1.49	1.01
100 P	58.09	13.36	1.49	1.01
75 P	60.61	13.94	1.50	1.01
50 P	60.60	13.94	1.50	1.01

Nota: (Autores, 2026).

El precio de referencia del maíz utilizado en el análisis fue de \$0.23 por libra, lo que permitió estandarizar la comparación económica entre tratamientos. La relación

beneficio/costo, aunque cercana entre todos los tratamientos, evidencia que la reducción en la dosis de fósforo acompañada de ZeoterA no compromete de manera significativa la rentabilidad del cultivo, abriendo la posibilidad de prácticas más eficientes y ambientalmente responsables.

Discusión

La validación del método digital Leaf Doctor para cuantificar la severidad foliar de la mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*) demostró una precisión con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.96$. Este hallazgo es consistente con investigaciones previas en maíz que sugieren que el procesamiento de imágenes reduce significativamente el sesgo del evaluador y el error humano inherente a las escalas visuales tradicionales (Vinces-Tachong et al., 2022). La literatura científica subraya que las estimaciones visuales suelen ser subjetivas y propensas a sobreestimar la enfermedad cuando las lesiones son numerosas y de tamaño reducido (Hernández & Sandoval, 2015; Bock et al., 2021). Por tanto, el uso de algoritmos basados en el reconocimiento de píxeles para identificar tejidos sanos frente a dañados garantiza una mayor reproducibilidad de los datos en condiciones de campo (Vinces-Tachong et al., 2022; Herrera-Eguez et al., 2025).

En cuanto al manejo fitosanitario, el tratamiento compuesto por $75 \text{ kg P ha}^{-1} + 50 \text{ kg ZeoterA ha}^{-1}$ se destacó por reducir significativamente la severidad de la enfermedad. Este efecto supresivo puede explicarse por las propiedades fisicoquímicas de las zeolitas (aluminosilicatos del tipo clinoptilolita), las cuales actúan como acondicionadores del suelo y portadores de nutrientes de liberación lenta (Ramesh & Reddy, 2011; Omar et al., 2015). Estudios recientes en otros cultivos, como el fréjol (*Phaseolus vulgaris*), han documentado que el uso de ZeoterA está directamente involucrado en una menor incidencia de enfermedades fúngicas al actuar como una barrera protectora y optimizador del vigor de la planta (Pazmiño-

Muñoz et al., 2023). El aporte equilibrado de minerales puede fortalecer las barreras estructurales de la planta y activar mecanismos de defensa naturales frente al estrés biótico (Bermeo-Toledo et al., 2025).

Respecto a los atributos morfológicos, la combinación de 125 kg P ha⁻¹ + 50 kg ZeoterA ha⁻¹ mejoró la longitud y el diámetro de la mazorca. Sin embargo, este incremento en el desarrollo reproductivo no se tradujo en un aumento determinante del rendimiento total. Este comportamiento sugiere que, si bien la zeolita optimiza la partición de asimilados hacia la mazorca debido a su alta capacidad de intercambio catiónico y retención de humedad (Ramesh & Reddy, 2011; Pazmiño-Muñoz et al., 2023), el rendimiento final puede estar condicionado por la severidad del ataque del patógeno en etapas críticas como la floración (Bajet et al., 1994). No obstante, la capacidad de la zeolita para funcionar como un fertilizante de liberación lenta para el fósforo explica la tendencia positiva en la arquitectura de la mazorca (Bansiwal et al., 2006).

Finalmente, la integración de ZeoterA con dosis reducidas de fósforo permitió mantener rendimientos y rentabilidades similares al control, lo que fundamenta una transición hacia una agricultura más eficiente. El uso de zeolitas reduce la lixiviación de fertilizantes y aumenta la eficiencia en el uso de los mismos, minimizando el impacto ambiental negativo asociado a la fertilización química intensiva (Nunes et al., 2021; Pazmiño-Muñoz et al., 2023). Económicamente, esta estrategia es viable ya que permite optimizar los costos de producción y mejorar la resiliencia del cultivo frente al complejo de la mancha de asfalto, promoviendo una producción competitiva y ecológicamente responsable (Herrera-Eguez et al., 2025; Bermeo-Toledo et al., 2025).

Conclusión

El análisis realizado demuestra que el uso del procesador digital Leaf Doctor constituye una herramienta confiable y objetiva para la evaluación de la mancha de asfalto, al mostrar una alta correlación con la escala visual tradicional. Asimismo, la combinación de 75 kg P ha⁻¹ + 50 kg ZeoterA ha⁻¹ se destacó por reducir la severidad de la enfermedad, mientras que el tratamiento con 125 kg P ha⁻¹ + 50 kg ZeoterA ha⁻¹ mejoró atributos morfológicos de la mazorca, aunque sin impacto significativo en el rendimiento. Finalmente, la inclusión de ZeoterA junto con dosis reducidas de fósforo permitió mantener niveles de producción y rentabilidad similares al control, lo que sugiere un manejo más sostenible y eficiente de la fertilización en el cultivo de maíz.

Referencias bibliográficas

- Avellaneda-Vázquez, J. P., & Herrera-Egüez, F. E. (2024). Dosis de silicio como nueva estrategia para el control de la mancha marrón (*Bipolaris oryzae*) en arroz (*Oryza sativa* L.). Editorial Grupo AEA.
- Bajet, N. B., Renfro, B. L., & Valdéz-Carrasco, J. M. V. (1994). Control of tar spot of maize and its effect on yield. *International Journal of Pest Management*, 40(2), 121–125. <https://doi.org/10.1080/09670879409371877>
- Bansiwal, A. K., Rayalu, S. S., Labhasetwar, N. K., Juwarkar, A. A., & Devotta, S. (2006). Surfactant-modified zeolite as a slow release fertilizer for phosphorus. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(13), 4773–4779. <https://doi.org/10.1021/jf060034b>
- Bermeo-Toledo, C. R., Granados-Rivas, Y. E., Suárez-Chichande, V. L., & Herrera-Egüez, F. E. (2025). Evaluación agroeconómica de dosis de azufre en el manejo de mancha de asfalto del maíz. *Código Científico Revista de Investigación*, 6(E2), 988–1006.
- Bock, C. H., Chiang, K. S., & Del Ponte, E. M. (2021). Plant disease severity estimated visually: A century of research, best practices, and opportunities for improving methods and practices to maximize accuracy. *Tropical Plant Pathology*, 46(4), 475–491.
- Carrillo, C. (2009). El origen del maíz: naturaleza y cultura en Mesoamérica. *Ciencias*, 92, 4–13.
- Cruz, O. (2013). El cultivo de maíz. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2010). InfoStat (Versión 2010) [Software]. Grupo InfoStat, FCA, Universidad

- Nacional de Córdoba. <https://www.infostat.com.ar>
- FAO. (2023). El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2023. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://doi.org/10.4060/cc3017es>
- Hernández, L., & Sandoval, J. (2015). Escala diagramática de severidad para el complejo mancha de asfalto del maíz. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33(1), 95–103.
- Herrera-Eguez, F. E., Plaza-Zambrano, P. M., García-Gallirgos, V. J., & Chele-Merchán, G. V. (2025). Magnesio como estrategia de manejo contra la mancha de asfalto en el cultivo de maíz. *Código Científico Revista de Investigación*, 6(E2), 1030–1044.
- Hock, J., Kranz, J., & Renfro, B. L. (1989). El complejo “mancha de asfalto” de maíz: Su distribución geográfica, requisitos ambientales e importancia económica en México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 7(2), 129–135.
- Jiménez, W., Leiva, D., Loayza, V., Muyulema, W., Pérez, P., Ruiz, V., Simbaña, B., & Yépez, R. (2015). Estimación de superficie sembrada de arroz (*Oryza sativa* L.) y maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) en las épocas de invierno y verano año 2015, en las provincias de Manabí, Los Ríos, Guayas, Santa Elena, Loja y El Oro. SINAGAP. http://sinagap.agricultura.gob.ec/pdf/estudios_agroeconomicos/estimacion_superficie_arroz_maiz-2015.pdf
- Kleczewski, N. M., Plewa, D. E., Bissonnette, K. M., Bowman, N. D., Byrne, J. M., LaForest, J., Dalla-Lana, F., Malvick, D. K., Mueller, D. S., Chilvers, M. I., Paul, P. A., Raid, R. N., Robertson, A. E., Ruhl, G. E., Smith, D. L., & Telenko, D. E. P. (2020). Documenting the establishment, spread, and severity of *Phyllachora maydis* on corn in the United States. *Journal of Integrated Pest Management*, 11(1), 14. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmaa012>
- Maublanc, A. (1904). Espèces nouvelles de champignons inférieurs. *Bulletin de la Société Mycologique de France*, 20, 72–74.
- Mengutay, M., Ceylan, Y., Kutman, U. B., & Cakmak, I. (2013). Adequate magnesium nutrition mitigates adverse effects of heat stress on maize and wheat. *Plant and Soil*, 368(1), 57–72. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1540-z>
- Nunes, A. S., Gonçalves-Vidigal, M. C., Martins, V. S. R., Xavier, A. S., Valentini, G., Vaz Bisneta, M., & Vidigal Filho, P. S. (2021). Relationship of *Colletotrichum lindemuthianum* races and resistance loci in the *Phaseolus vulgaris* L. genome. *Crop Science*, 61(6), 3877–3893. <https://doi.org/10.1002/csc2.20620>
- Omar, L., Ahmed, O. H., & Majid, N. M. A. (2015). Improving ammonium and nitrate release from urea using clinoptilolite zeolite. *The Scientific World Journal*, 2015, Article 574201. <https://doi.org/10.1155/2015/574201>
- Pazmiño-Muñoz, E. M., Sánchez-Iznaga, Á. L., Realpe-Idurte, J. A., Baldion-Prieto, G. J., & Romero-Troya, Y. A. (2023). Uso de aluminosilicato clinoptilolita (ZeoterA) en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*) controlando antracnosis (*Colletotrichum lindemuthianum*) bajo diferentes dosis de fósforo. *Ingeniería Química y Desarrollo*, 5(2), 16–21.
- Pereyda-Hernández, J., Hernández-Morales, J., Sandoval-Islas, J. S., Aranda-Ocampo, S., de León, C., & Gómez-Montiel, N. (2009). Etiología y manejo de la mancha de asfalto

- (Phyllachora maydis Maubl.) del maíz en Guerrero, México. *Agrociencia*, 43(5), 511–519.
- Pethybridge, S. J., & Nelson, S. C. (2015). Leaf Doctor: A new portable application for quantifying plant disease severity. *Plant Disease*, 99(10), 1310–1316. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0319-RE>
- Ramesh, K., & Reddy, D. D. (2011). Zeolites and their potential uses in agriculture. *Advances in Agronomy*, 113, 219–241.
- Selva-Preetha, P., & Balakrishnan, N. (2017). A review of nano fertilizers and their use and functions in soil. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(12), 3117–3133.
- Vinces-Tachong, R. E., Vélez-Ruiz, M. C., Gaibor-Fernández, R. R., & Herrera-Eguez, F. E. (2022). Implementación del procesamiento de imágenes para la evaluación de la mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*) en maíz (*Zea mays*). *Terra Latinoamericana*, 40, 1–7.
- Zagar, S., Mahajan, R., Bhat, J., Nazir, M., & Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. *3 Biotech*, 9, Article 73. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1605-3>