RECIENA
Revista Científica Agropecuaria
ISSN 2773 - 7608
https://reciena.espoch.edu.ec/index.php/reciena/index
Facultad de Ciencias Pecuarias

ARTÍCULO ORIGINAL *Recibido:* 24/05/2026 · *Aceptado:* 05/07/2026 · *Publicado:* 07/10/2026
DOI: https://doi.org/10.47187/h49apg35

EFECTO COMBINADO DE MICORRIZAS Y ÁCIDOS HÚMICOS SOBRE EL CRECIMIENTO DEL MAÍZ (*ZEA MAYS L.*) EN CONDICIONES AMAZÓNICAS: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA (2020-2026)

COMBINED EFFECT OF MYCORRHIZAE AND HUMIC ACIDS ON MAIZE (*ZEA MAYS L.*) GROWTH UNDER AMAZONIAN CONDITIONS: A LITERATURE REVIEW (2020–2026)

[1] Ahinara Mena*	ahinara.mena@espoch.edu.ec
[1] Anahi Yascely Ramirez Zambrano	anahi.ramirez@espoch.edu.ec
[1] Jordy Javier Vera Cuenca	jordy.vera@espoch.edu.ec

[1] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Recursos Naturales, Puerto Francisco de Orellana, Ecuador.

E-mail: * ahinara.mena@espoch.edu.ec

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo analizar la evidencia científica publicada entre 2020 y 2026 sobre el efecto combinado de las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos en el crecimiento del maíz (*Zea mays* L.) en condiciones amazónicas, identificando sus efectos fisiológicos, nutricionales y agronómicos, así como los mecanismos que explican su interacción en el suelo y la planta. La investigación correspondió a una revisión bibliográfica desarrollada conforme a las directrices PRISMA 2020. La búsqueda se realizó exclusivamente en la base de datos Scopus mediante una estrategia de búsqueda estructurada, obteniéndose 338 registros iniciales. Posteriormente, se aplicaron criterios de inclusión y exclusión, además de un proceso de cribado manual, seleccionándose 76 artículos científicos para la síntesis cualitativa. La evidencia analizada mostró que las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos favorecen el crecimiento, la absorción de nutrientes, el desarrollo radicular y el rendimiento del maíz, especialmente en suelos ácidos y de baja disponibilidad de fósforo. Asimismo, los estudios que evaluaron su aplicación conjunta reportaron principalmente efectos aditivos o sinérgicos, aunque persiste una limitada evidencia obtenida directamente en condiciones amazónicas. Se concluye que la aplicación combinada de ambos bioestimulantes representa una estrategia sostenible con alto potencial para mejorar la productividad del maíz y la calidad del suelo; sin embargo, se requieren investigaciones de campo en la Amazonía que permitan validar estos resultados y fortalecer su aplicación en los sistemas agrícolas de la región.

Palabras clave: *Zea mays* L.*; absorción de nutrientes; ácidos húmicos; micorrizas arbusulares; productividad agrícola.*

ABSTRACT

This study aimed to analyze the scientific evidence published between 2020 and 2026 on the combined effects of arbuscular mycorrhizal fungi and humic acids on the growth of maize (Zea mays L.) under Amazonian conditions, identifying their physiological, nutritional, and agronomic effects, as well as the mechanisms underlying their interaction in the soil–plant system. The research consisted of a literature review conducted in accordance with the PRISMA 2020 guidelines. The literature search was performed exclusively in the Scopus database using a structured search strategy, yielding 338 initial records. After applying the inclusion and exclusion criteria and conducting a manual screening process, 76 scientific articles were selected for qualitative synthesis. The reviewed evidence showed that arbuscular mycorrhizal fungi and humic acids consistently improve maize growth, nutrient uptake, root development, and yield, particularly in acidic soils with low phosphorus availability. Studies evaluating their combined application mainly reported additive or synergistic effects; however, scientific evidence obtained directly under Amazonian conditions remains limited. It is concluded that the combined use of these biostimulants represents a sustainable strategy with high potential to improve maize productivity and soil quality. Nevertheless, field studies conducted under Amazonian conditions are still needed to validate these findings and support their implementation in regional agricultural systems.

Keywords: *Zea mays L.; arbuscular mycorrhizal fungi; humic acids; agricultural productivity; nutrient uptake.*

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura mundial enfrenta el desafío de aumentar la productividad de los cultivos básicos sin profundizar el deterioro de los suelos ni la dependencia de insumos químicos de síntesis. El maíz (*Zea mays* L.), como uno de los cereales de mayor relevancia alimentaria y económica a nivel global, ha sido uno de los cultivos más estudiados en la búsqueda de alternativas de manejo que concilien productividad y sostenibilidad [1]. En este contexto, los bioestimulantes agrícolas, entendidos como sustancias o microorganismos capaces de modificar procesos fisiológicos de las plantas, independientemente de su contenido nutricional, han adquirido un papel central dentro de las estrategias de intensificación sostenible, al ofrecer mecanismos complementarios o alternativos a la fertilización convencional [2].

Entre los bioestimulantes con mayor evidencia científica acumulada en los últimos años destacan las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos. Las micorrizas arbusculares establecen asociaciones simbióticas con las raíces del maíz que amplían la superficie efectiva de exploración del suelo y facilitan la absorción de fósforo y otros nutrientes de baja movilidad [3], mientras que los ácidos húmicos, como fracción bioactiva de la materia orgánica del suelo, actúan sobre la fisiología vegetal al estimular la división celular, la fotosíntesis y la síntesis de aminoácidos [4], [5], además de mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Diversos estudios recientes han evaluado ambos bioestimulantes de forma individual [6], [7], [8] y, en un número más reducido de investigaciones, de manera combinada [9], [10], [11], [12], [13], reportando, en términos generales, efectos positivos sobre el crecimiento, la nutrición y el rendimiento del maíz.

Sin embargo, la evidencia disponible proviene mayoritariamente de estudios desarrollados en condiciones edafoclimáticas templadas, mediterráneas o áridas. China, Brasil, Italia, Marruecos e Indonesia concentran la mayor parte de la producción científica reciente sobre el tema, mientras que las condiciones amazónicas, caracterizadas por suelos ácidos, de baja fertilidad natural y elevada lixiviación de nutrientes, permanecen prácticamente ausentes de la literatura científica primaria. Esta brecha resulta especialmente relevante porque la eficacia de las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos depende, en gran medida, de las condiciones edáficas iniciales. En suelos con alta disponibilidad de fósforo, por ejemplo, la respuesta micorrízica del maíz puede ser limitada o incluso negativa, mientras que, en suelos de baja fertilidad, como los predominantes en la Amazonía, la dependencia micorrízica del cultivo tiende a ser mayor [3]. En consecuencia, los resultados obtenidos en otras regiones solo pueden extrapolarse de manera parcial a los sistemas amazónicos, lo que pone de manifiesto la necesidad de analizar críticamente la evidencia científica disponible antes de proponer su aplicación en estos ambientes.

Frente a este panorama, la presente revisión bibliográfica tuvo como objetivo analizar la evidencia científica publicada entre 2020 y 2026 sobre el efecto combinado de las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos en el crecimiento del maíz (*Zea mays* L.) en condiciones amazónicas, identificando sus efectos fisiológicos, nutricionales y agronómicos, así como los mecanismos que explican su interacción en el sistema suelo-planta. Asimismo, se buscó sintetizar las principales tendencias de investigación, los avances alcanzados y los vacíos de conocimiento identificados en la literatura científica, con el propósito de aportar una base teórica que oriente futuras investigaciones y contribuya al desarrollo de estrategias de manejo sostenible para los sistemas agrícolas amazónicos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Metodología de búsqueda y selección de artículos

Los procedimientos de revisión de la literatura científica sobre el efecto combinado de las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos en el crecimiento del maíz (*Zea mays* L.) se llevaron a cabo siguiendo las directrices de la declaración PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Esta metodología fue seleccionada debido a su amplia aceptación en revisiones sistemáticas y a su capacidad para garantizar la transparencia, reproducibilidad y rigurosidad científica durante los procesos de identificación, selección, elegibilidad e inclusión de estudios, permitiendo establecer criterios claros para la recopilación, depuración y síntesis de la evidencia científica disponible sobre la temática de estudio [14].

Fuentes de información y búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó en la base de datos científica Scopus, debido a su amplia cobertura de literatura indexada en ciencias agrícolas y ambientales y su reconocimiento internacional en la difusión de investigaciones de alto impacto. Para la recuperación de información se consideraron los campos de título, resumen y palabras clave de cada documento.

La estrategia de búsqueda se diseñó mediante la combinación de términos relacionados con el maíz (*Zea mays* L.) y las dos categorías de bioestimulantes de interés micorrizas arbusculares y ácidos húmicos, utilizando los operadores booleanos "AND" y "OR" para ampliar y refinar la recuperación de estudios potencialmente relevantes. La ecuación de búsqueda utilizada se presenta en la Tabla 1.

Criterios de elegibilidad

La búsqueda se limitó a artículos científicos publicados entre el 1 de enero de 2020 y el 31 de diciembre de 2026, en idioma inglés o español. Posteriormente, la base de datos fue refinada mediante la aplicación de criterios de elegibilidad previamente establecidos con el fin de garantizar la pertinencia y calidad de la evidencia científica recopilada. Los estudios incluidos debían cumplir con las siguientes condiciones: i) estar relacionados directamente con el cultivo de maíz (*Zea mays* L.); ii) evaluar la aplicación de micorrizas arbusculares, ácidos húmicos o su combinación; iii) reportar variables de respuesta asociadas al crecimiento, desarrollo, biomasa, absorción de nutrientes, desarrollo radicular, rendimiento, productividad o calidad del suelo.

Fueron excluidos los documentos duplicados, tesis, capítulos de libro, editoriales, resúmenes de congresos, revisiones bibliográficas y publicaciones sin acceso al texto completo. Del mismo modo, se descartaron estudios realizados en especies distintas al maíz, investigaciones centradas exclusivamente en otros biofertilizantes o microorganismos no relacionados con micorrizas o ácidos húmicos, y menciones incidentales de los términos de búsqueda sin relación real con el objeto de estudio.

Estrategia de búsqueda e identificación de estudios

La identificación de estudios se realizó mediante una búsqueda sistemática en la base de datos Scopus, considerando los campos de título, resumen y palabras clave. La plantilla del diagrama de flujo PRISMA 2020 (Figura 1) fue utilizada para documentar el proceso de identificación, selección, elegibilidad e inclusión de los estudios considerados en esta revisión.

1. **Identificación:** Se definieron términos y palabras clave relacionados con el maíz y los bioestimulantes de interés, aplicándose la estrategia de búsqueda en Scopus (Tabla 1), obteniéndose un total de **338 registros bibliográficos**.

2. **Selección y elegibilidad:** Los 338 registros fueron sometidos a una revisión automatizada de títulos, resúmenes y palabras clave según los criterios de elegibilidad, resultando en **105 documentos** aptos para lectura crítica. Tras la revisión detallada de estos 105 estudios, se excluyeron **29 documentos** por corresponder a especies distintas al maíz, presentar menciones incidentales de los términos de búsqueda o no reportar una aplicación real de micorrizas o ácidos húmicos como tratamiento.

3. **Inclusión:** Finalmente, **76 artículos científicos** cumplieron con todos los criterios de inclusión y fueron incorporados a la síntesis cualitativa final. Los estudios seleccionados fueron organizados en una matriz de extracción de datos elaborada en Microsoft Excel, permitiendo la sistematización de la información bibliográfica, metodológica y temática utilizada para el análisis y la elaboración de tablas y figuras.

Tabla 1. *Estrategia de búsqueda utilizada para la identificación de estudios relacionados con el efecto combinado de micorrizas y ácidos húmicos en maíz.*

Base de datos	Cadena de búsqueda
Scopus	TITLE-ABS-KEY ((maize OR corn OR "Zea mays") AND (mycorrhiza* OR "arbuscular mycorrhiza*" OR AMF OR "mycorrhizal fungi") AND (humic* OR "humic acid*" OR "humic substances" OR humate*))

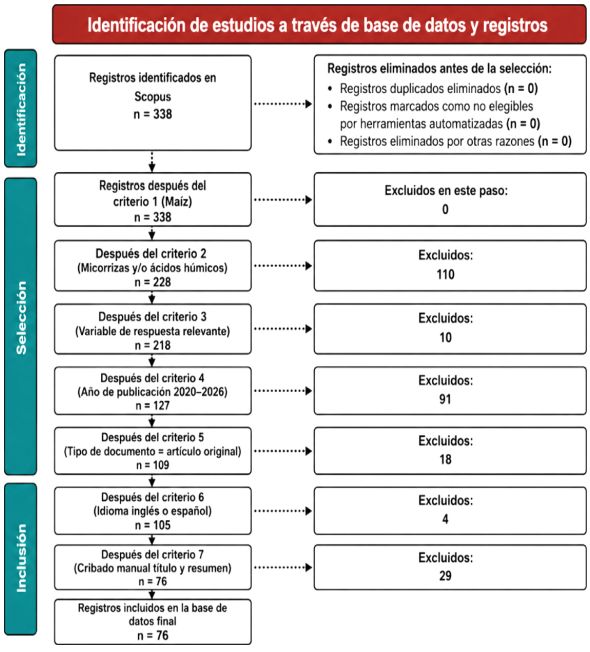


Figura 1. *Diagrama de flujo del proceso de identificación, selección, elegibilidad e inclusión de estudios sobre el efecto combinado de micorrizas y ácidos húmicos en maíz, elaborado de acuerdo con las directrices PRISMA 2020.*

Análisis de datos

Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico se realizó con el propósito de identificar las principales tendencias de investigación sobre el efecto combinado de micorrizas y ácidos húmicos en maíz durante el período 2020–2026. Se evaluó la evolución temporal de las publicaciones científicas mediante el registro del número de artículos publicados por año, así como la contribución de los países participantes en las investigaciones, identificándose a China, Brasil, Italia, Marruecos e Indonesia como los principales aportantes.

Análisis sistemático

El análisis sistemático se centró en la síntesis e interpretación de la evidencia científica contenida en los 76 estudios seleccionados. Para ello, los artículos fueron clasificados en tres categorías temáticas principales, alineadas con los objetivos específicos de la investigación: efectos individuales y combinados de las micorrizas y los ácidos húmicos sobre el crecimiento y rendimiento del maíz; mecanismos fisiológicos y edáficos de dicha interacción; e importancia agronómica y ambiental de su aplicación combinada como estrategia sostenible. La información recopilada fue organizada en matrices de análisis elaboradas en Microsoft Excel, permitiendo la sistematización de resultados y la elaboración de tablas y figuras de síntesis.

3. RESULTADOS

a) Análisis bibliométrico

Evolución de la producción científica (2020–2026). El análisis de la distribución temporal de los 76 artículos incluidos evidencia una producción científica sostenida a lo largo de todo el período evaluado, sin variaciones abruptas: 10 artículos en 2020, 12 en 2021, 9 en 2022, 8 en 2023, 12 en 2024, 14 en 2025 y 11 en lo que va de 2026. Este comportamiento indica que el interés investigativo por el uso combinado o individual de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos en maíz no es un fenómeno emergente puntual, sino una línea de investigación consolidada que se ha mantenido activa de manera constante durante los últimos siete años, con un ligero repunte en 2025.

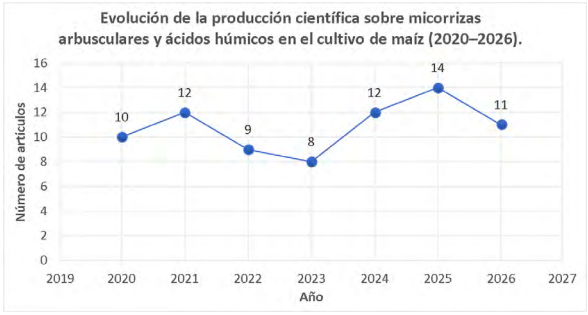


Figura 2. *Evolución anual de las publicaciones científicas incluidas en la revisión bibliográfica (2020–2026).*

Contribución de los países. Los 76 estudios incluidos fueron desarrollados por autores afiliados a 25 países distintos, lo que refleja una dispersión geográfica amplia del interés científico sobre la temática. China concentra la mayor producción (14 artículos, 18,4%), seguida de Brasil (9; 11,8%), y de un bloque intermedio conformado por Italia, Marruecos e Indonesia (6 artículos cada uno; 7,9%). India, Estados Unidos, Arabia Saudita y Egipto aportan 3 estudios cada uno, mientras que el resto de países (Pakistán, México, Bélgica, Polonia, Irán, Colombia, Kazajistán, entre otros) contribuyen con 1 o 2 artículos. Es relevante señalar que, si bien ningún país amazónico figura entre los principales aportantes, buena parte de la producción proviene de contextos con condiciones edáficas y climáticas comparables suelos tropicales o subtropicales de baja fertilidad en Brasil, Indonesia, Marruecos y Egipto, lo que otorga cierta pertinencia indirecta a estos hallazgos para su eventual extrapolación a sistemas amazónicos.



Figura 3. *Principales países cooperantes en la producción científica sobre micorrizas arbusculares y ácidos húmicos en el cultivo de maíz (Zea mays L.) durante el período 2020–2026.*

Coocurrencia de palabras clave. El análisis de las palabras clave declaradas por los propios autores permite identificar los principales enfoques temáticos de la literatura revisada. Los términos con mayor frecuencia fueron *maize* (12 apariciones), *arbuscular*

mycorrhizal fungi (8) y *humic substances* (8), seguidos de *biostimulant/biostimulants* (13 en conjunto), *compost* (6), *soil fertility* (6) y *sustainable agriculture* (5). La presencia recurrente de términos como *soil amendment*, *phosphorus, abiotic stress* y *antioxidants* sugiere que gran parte de la investigación reciente no solo evalúa el efecto de estos bioestimulantes sobre el crecimiento del maíz per se, sino que los enmarca dentro de estrategias más amplias de manejo sostenible del suelo y de mitigación de estrés abiótico (hídrico, salino, por metales pesados), un enfoque directamente relevante para las condiciones amazónicas.

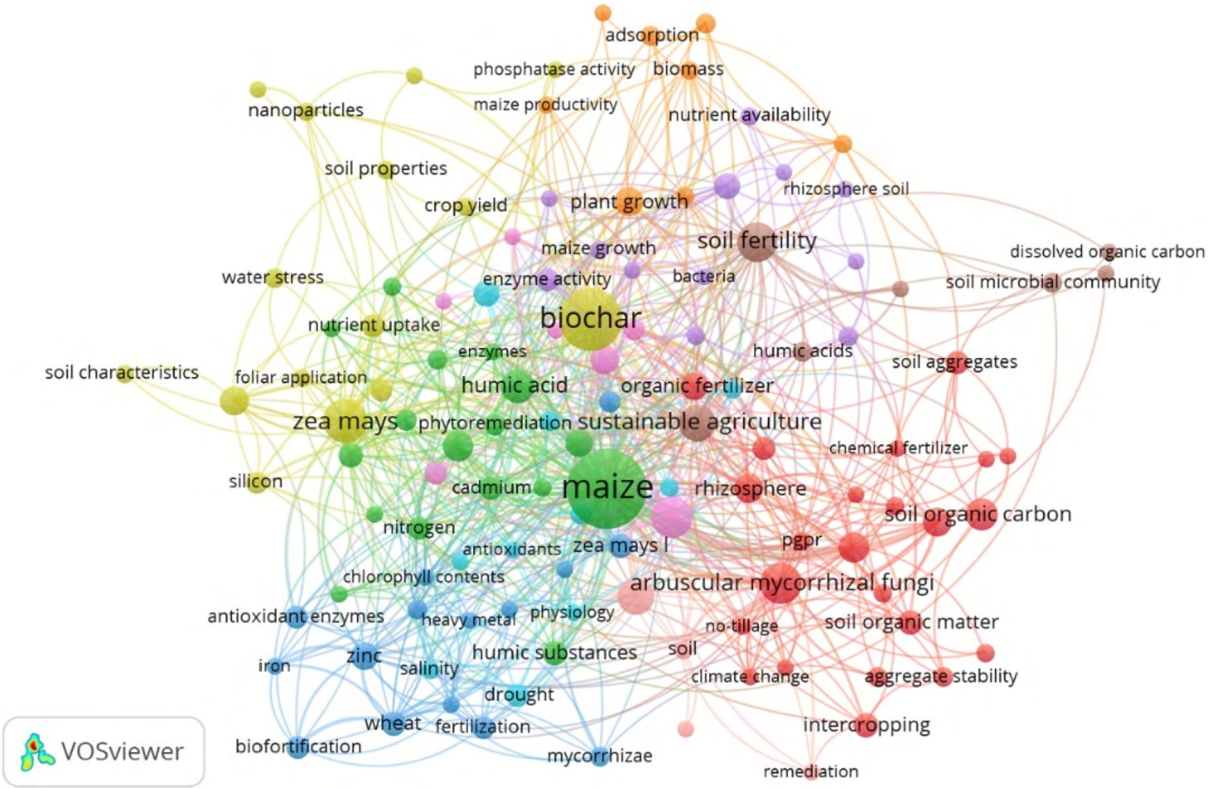


Figura 4. *Red de coocurrencia de palabras clave de la producción científica sobre micorrizas arbusculares, ácidos húmicos y maíz (Zea mays L.).*

b) Efectos de las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos sobre el crecimiento y rendimiento del maíz



Figura 5. *Síntesis de los efectos individuales y combinados de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos sobre el crecimiento y rendimiento del maíz, con mayor magnitud de respuesta en suelos de baja disponibilidad de fósforo, condición característica de los suelos amazónicos.*

Efectos de las micorrizas arbusculares aplicadas de forma individual. La mayoría de los estudios que evaluaron la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en maíz reportaron efectos positivos sobre variables de crecimiento, biomasa y rendimiento, aunque con una magnitud claramente dependiente del contexto edáfico. [15] observaron que la combinación de endomicorrizas con fosfocompost incrementó la longitud aérea del maíz de 90 a 210 cm y el número de hojas de 11 a 14 respecto al control. De manera similar, [16] reportaron rendimientos de semilla de hasta 8 198,5 kg/ha bajo labranza combinada con materia orgánica y hongos micorrízicos, mientras que [17] documentaron incrementos de 42,4% en altura y 117,6% en biomasa tras enmiendas orgánicas derivadas de caracoles manzana que favorecieron la colonización micorrízica. [18], [19], [20] coinciden en que la inoculación micorrízica combinada con fertilización orgánica o biofertilizantes mejora significativamente la productividad del maíz en suelos marginales o de baja fertilidad, condición estructuralmente similar a la de los suelos amazónicos.

No obstante, la evidencia no es unánime. [21] encontraron, en condiciones de campo, que la

respuesta micorrízica del maíz varía sustancialmente según la disponibilidad de fósforo del suelo, siendo positiva en la fase vegetativa bajo baja fertilidad, pero sin traducirse necesariamente en mayor rendimiento final. En la misma línea, [22] reportaron recientemente la ausencia de beneficios sinérgicos o complementarios entre hongos micorrízicos arbusculares y enmiendas orgánicas cuando se aplican de forma simultánea, lo que evidencia que el efecto de las micorrizas no es universal ni automáticamente aditivo con otras prácticas de manejo (véanse también [12], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35].

Efectos de los ácidos húmicos aplicados de forma individual. La aplicación de ácidos húmicos y sustancias húmicas afines mostró de manera consistente efectos positivos sobre la germinación, el crecimiento inicial y el rendimiento del maíz. [2] reportaron incrementos de rendimiento de 41,5 a 61 quintales por hectárea mediante la combinación de ácido húmico con extracto de algas, mientras que [36] documentaron aumentos de hasta 37% en longitud de mazorca y 11% en absorción de potasio al sustituir parcialmente la fertilización mineral por ácidos húmicos y aminoácidos. En un ensayo a gran escala con 448 parcelas comerciales, [37] encontraron que una sola aplicación foliar de bioestimulante húmico incrementó el rendimiento entre 7,6% y 15,7%, con un retorno económico adicional de 122 USD/ha. De forma consistente, observaron incrementos en la biomasa aérea del maíz incluso reduciendo en 40% la fertilización NPK convencional cuando esta se combinaba con sustancias húmicas.

Otros estudios aportan evidencia sobre condiciones de estrés: [38] reportaron que el ácido húmico redujo la acumulación de cadmio en las raíces del maíz mientras incrementaba su biomasa, y [4] demostraron que las sustancias húmicas incrementan hasta en 21% la incorporación de nitrógeno vía absorción directa de aminoácidos en plántulas de maíz. Resultados adicionales en esta misma dirección fueron reportados por [1], [6], [8], [13], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49]. Cabe destacar, sin embargo, que [50] reportaron que el efecto de estos bioestimulantes tiende a diluirse en evaluaciones de largo plazo, lo que sugiere la necesidad de considerar la persistencia temporal del efecto y no únicamente su respuesta inmediata.

Efectos de la aplicación combinada. Un número más reducido pero creciente de estudios ha evaluado la aplicación simultánea de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos. [9] encontraron que la combinación de hongos micorrízicos, *Azotobacter, Bacillus* y ácido húmico mejoró de forma conjunta el crecimiento, el rendimiento de grano y la calidad nutricional (azúcares, almidón y proteína) del maíz híbrido. [10] reportaron que la combinación de bacterias solubilizadoras de fósforo, ácidos húmicos y micorrizas arbusculares produjo la mayor absorción de fósforo entre todos los tratamientos evaluados, modificando además la composición del microbioma del suelo. De manera más reciente, [51] documentaron incrementos de hasta 18% en el rendimiento de maíz forrajero mediante la aplicación conjunta de ácido húmico y hongos micorrízicos en el subsuelo, mientras que [52] observaron mejoras en altura, diámetro y biomasa del maíz con té de compost enriquecido con ácido húmico, aunque sin afectar significativamente la tasa de colonización micorrízica, lo que sugiere que ambos bioestimulantes pueden actuar mediante vías complementarias pero no necesariamente dependientes entre sí.

En conjunto, la evidencia disponible indica que tanto las micorrizas arbusculares como los ácidos húmicos generan, de manera predominante, efectos positivos sobre el crecimiento y el rendimiento del maíz, con una magnitud de respuesta que depende fuertemente de la fertilidad basal del suelo siendo mayor en suelos pobres en fósforo y materia orgánica, condición característica de los suelos amazónicos, mientras que su aplicación combinada, aunque menos estudiada, muestra en la mayoría de los casos efectos aditivos o sinérgicos, aunque no siempre estadísticamente superiores a la aplicación individual de cada bioestimulante.

c) Mecanismos fisiológicos y edáficos de la interacción entre micorrizas arbusculares y ácidos húmicos

Más allá de los efectos observables sobre el crecimiento y el rendimiento, un conjunto de estudios recientes ha profundizado en los mecanismos moleculares, fisiológicos y edáficos que explican por qué las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos favorecen la nutrición y el desarrollo del maíz, aportando evidencia de nivel genético, enzimático y metabolómico que respalda los resultados agronómicos descritos previamente.

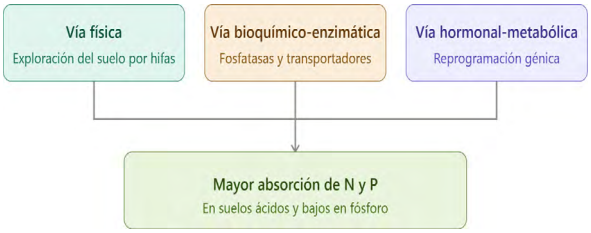


Figura 6. *Vías mecanísticas complementarias —física, bioquímico-enzimática y hormonal-metabólica— mediante las cuales las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos favorecen la absorción de nutrientes y el desarrollo radicular del maíz en condiciones edáficas.*

Mecanismos de absorción de nitrógeno y fósforo. A nivel molecular, [53] demostraron que las sustancias húmicas disueltas incrementan la absorción de nitrato en maíz mediante la sobreexpresión de genes transportadores y reguladores clave del metabolismo del nitrógeno (entre ellos *ZmNRT2.1, ZmNRT2.2* y *ZmNADH:NR)*, evidenciando que el efecto bioestimulante no es meramente nutricional, sino que opera mediante la activación de rutas génicas específicas. De forma complementaria, [54] reportaron que los lignohumatos incrementan la eficiencia de adquisición de fósforo en maíz al estimular la actividad de enzimas fosfatasas y fitasas, junto con cambios transcriptómicos en genes asociados a la señalización hormonal y al reciclaje interno de fósforo. Por su parte, [55] evaluaron distintas generaciones de cultivos de hongos micorrízicos arbusculares, encontrando que las cepas de segunda generación incrementaron la absorción de fósforo entre 80% y 97%, y el peso seco de la parte aérea entre 89% y 103%, lo que sugiere que la calidad y el manejo del inóculo micorrízico son determinantes tan importantes como su sola presencia.

Reprogramación metabólica y hormonal. A nivel bioquímico, [56] caracterizaron mediante metabolómica no dirigida más de 500 metabolitos afectados por las sustancias húmicas en maíz, identificando alteraciones en el metabolismo de almidón y sacarosa, en el ciclo de los ácidos tricarboxílicos (ciclo de Krebs) y en rutas de señalización hormonal tanto dependientes como independientes de fitohormonas clásicas. En un hallazgo particularmente relevante para condiciones de estrés edáfico como las que caracterizan a los suelos amazónicos, [57] encontraron que el ácido húmico artificial activa las rutas de biosíntesis de fenilpropanoides, fosforilación oxidativa y transducción de señales hormonales en plántulas de maíz sometidas a condiciones alcalinas, favoreciendo su tolerancia. De manera similar, [58] reportaron que, si bien el ácido húmico altera el ciclo de los ácidos tricarboxílicos durante la germinación, este efecto se traduce en una mejora de la resistencia a sequía en la progenie de la planta, mediada por la regulación positiva de la síntesis de ácidos grasos insaturados y alcaloides. [59] confirmaron efectos similares mediante la aplicación de ácido fúlvico exógeno vía riego al suelo, reforzando la promoción del crecimiento por vías fisiológicas convergentes.

Interacción combinada micorriza–ácido húmico a nivel metabólico. El estudio más directamente relacionado con el efecto combinado de ambos bioestimulantes, [60], demostró mediante perfilado de metabolitos que la aplicación conjunta de hongos micorrízicos arbusculares y ácido húmico mejora sustancialmente el metabolismo de azúcares en granos de maíz, evidenciando que la interacción entre ambos bioestimulantes no se limita a una simple suma de efectos independientes, sino que genera respuestas metabólicas específicas de la combinación.

Síntesis mecanística. En conjunto, esta evidencia permite identificar al menos tres vías mecanísticas complementarias mediante las cuales las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos favorecen la absorción de nutrientes y el desarrollo radicular del maíz: (i) una vía de exploración física del suelo, mediada por la red de hifas micorrízicas que amplía el volumen de suelo explorado por el sistema radicular; (ii) una vía bioquímico-enzimática, mediada por la activación de fosfatasas, fitasas y transportadores de nutrientes; y (iii) una vía de señalización hormonal y metabólica, mediada por la reprogramación transcripcional y metabolómica inducida por las sustancias húmicas. Estas tres vías resultan especialmente pertinentes para suelos ácidos y de baja disponibilidad de fósforo como los predominantes en la Amazonía, en la medida en que atacan simultáneamente las principales limitantes edáficas de dichos sistemas: la baja movilidad del fósforo, la reducida actividad biológica del suelo y la susceptibilidad de las plantas al estrés abiótico asociado a suelos ácidos.

d) Importancia agronómica y ambiental de la aplicación combinada como estrategia sostenible



Figura 7. *Aportes de la aplicación combinada de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos como estrategia agronómica y ambientalmente sostenible, mediante la reducción de insumos químicos, la mitigación de estrés abiótico (hídrico y salino) y la fitorremediación.*

Sostenibilidad y reducción de insumos químicos. Uno de los principales argumentos que sustentan el uso combinado de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos es su capacidad para reducir la dependencia de fertilizantes minerales sin comprometer la productividad. [11] evaluaron un acondicionador de suelo enriquecido con biofertilizantes incluyendo micorrizas y ácido húmico sobre andisoles, encontrando mejoras simultáneas en la fertilidad del suelo y el crecimiento del maíz. En la misma dirección, [61] reportaron que el manejo integrado de nutrientes incrementó las fracciones activas y pasivas de materia

orgánica del suelo, incluyendo el contenido de ácidos húmicos, mientras que [62] documentaron que la intercalación de maíz con abono verde incrementó el pH del suelo, la actividad enzimática y el beneficio económico del sistema en 56,4%, evidenciando que estas estrategias no solo tienen impacto agronómico sino también económico.

Mitigación de estrés abiótico. Una línea de evidencia particularmente relevante para las condiciones amazónicas es la capacidad de estos bioestimulantes para mitigar distintos tipos de estrés abiótico. [4] demostraron que los ácidos húmicos actúan como agentes de "priming" químico, preparando fisiológicamente al maíz frente a múltiples estresores (salinidad, sequía, cromo), mientras que [63] confirmaron que este acondicionamiento mejora la tolerancia a la salinidad en maíz y tomate mediante el balance iónico, la actividad de bombas de protones y la eficiencia fotosintética. Frente al estrés hídrico de particular relevancia en la variabilidad hídrica amazónica, [64], [65] reportaron que el ácido húmico mejora la tolerancia a la sequía en maíz de forma más marcada que en sorgo, con incrementos de hasta 29,2% en la tasa fotosintética. De manera complementaria, [66], [67] encontraron que la combinación de compost, micorrizas arbusculares y nanopartículas de carbono mitigó el estrés por sequía, incrementando la biomasa en 20,1% bajo condiciones normales y en 39,4% bajo sequía, mientras que [68] reportaron incrementos de hasta 238% en biomasa aérea de maíz dulce bajo estrés salino mediante bioestimulantes indígenas (compost, Bacillus y micorrizas).

Fitorremediación y calidad ambiental del suelo. La aplicación combinada de estos bioestimulantes también ha mostrado beneficios en la remediación de suelos contaminados, un aspecto de creciente relevancia en zonas de frontera agrícola amazónica afectadas por actividades extractivas. [69] reportaron que un extracto alcalino de vermicompost redujo el estrés inducido por arsénico en maíz, incrementando su capacidad de fitoextracción, mientras que [70], [71] documentaron que la combinación de biocarbón y hongos micorrízicos arbusculares promovió el crecimiento del maíz al tiempo que redujo la biodisponibilidad de plomo y mitigó el estrés inducido por cobalto, respectivamente. Más recientemente, [72], [73] confirmaron que la co-inoculación de compost con hongos micorrízicos y bacterias endofíticas, o su combinación con enmiendas orgánicas, alivia eficazmente el estrés hídrico y salino en maíz, reforzando el papel de estas estrategias como herramientas de adaptación agroambiental. Evidencia adicional en esta línea fue aportada por [3], [74], [75]

Síntesis. En conjunto, esta evidencia respalda la hipótesis de que la aplicación combinada de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos constituye una estrategia agronómica y ambientalmente pertinente para sistemas de baja fertilidad y alta vulnerabilidad ambiental como los amazónicos, no solo por su efecto directo sobre el crecimiento del maíz, sino por su contribución a la reducción de insumos químicos, la mitigación de estrés hídrico y salino, y la recuperación de suelos degradados o contaminados, tres desafíos centrales para la sostenibilidad de la agricultura en la región.

e) 3.5 Tendencias, avances y vacíos de investigación entre 2020 y 2026



Figura 8. *Evolución temporal del enfoque de investigación entre 2020 y 2026, desde evaluaciones agronómicas convencionales hacia enfoques mecanísticos y de mitigación de estrés abiótico. Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica.*

Tendencias temporales. El análisis de la distribución anual de los 76 artículos incluidos permite identificar un cambio cualitativo en el enfoque de la investigación a lo largo del período. Entre 2020 y 2022, la mayoría de los estudios se concentraron en evaluaciones agronómicas convencionales crecimiento, biomasa y rendimiento bajo condiciones de fertilidad contrastante [15], [16], [21]. A partir de 2022–2023 se observa un giro progresivo hacia enfoques mecanísticos de mayor resolución, con la incorporación de herramientas metabolómicas y transcriptómicas [54], [56], [57], [58], y hacia la evaluación de estos bioestimulantes como herramientas de mitigación de estrés abiótico sequía, salinidad, metales pesados [64], [65], [66], [67], [68], [71]). Este desplazamiento sugiere que la comunidad científica ha superado la pregunta inicial de "si funcionan" para concentrarse en "cómo funcionan" y "en qué condiciones de estrés son más útiles", una evolución que resulta favorable para su eventual aplicación en contextos ambientalmente exigentes como la Amazonía.

Avances metodológicos. Un avance notable es la diversificación de las fuentes de ácidos húmicos evaluadas lignito, compost, estiércol de cabra, vermicompost, síntesis artificial e incluso subproductos agroindustriales como el rastrojo de maíz o el estiércol porcino [7], [13], [46], lo que amplía las opciones de obtención de este insumo bajo un enfoque de economía circular, particularmente relevante en sistemas amazónicos con alta disponibilidad

de biomasa residual pero acceso limitado a insumos comerciales importados. Asimismo, se observa un interés creciente por optimizar la calidad del inóculo micorrízico evaluando generaciones sucesivas de cultivo [55] o sustratos alternativos de producción, como lodos de depuradora [25] más allá de la sola presencia o ausencia de inoculación.

Vacíos de investigación identificados. No obstante, estos avances, la revisión permite identificar al menos cuatro vacíos relevantes:

1. **Ausencia de estudios en condiciones amazónicas específicas.** Ninguno de los 76 artículos incluidos fue desarrollado directamente en suelos o climas amazónicos; la evidencia disponible proviene principalmente de China, Brasil, Italia, Marruecos e Indonesia, lo que limita la validez directa de las conclusiones para la región y refuerza la necesidad de investigación primaria local.

2. **Desbalance entre estudios individuales y combinados.** Del total de artículos revisados, solo 6 evaluaron de manera simultánea y explícita la combinación de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos [9], [10], [11], [51], [52], [60], frente a 33 estudios centrados únicamente en micorrizas y 37 únicamente en ácidos húmicos. Esta asimetría limita la capacidad de establecer conclusiones robustas sobre la naturaleza exacta de la interacción (aditiva, sinérgica o neutra) entre ambos bioestimulantes.

3. **Heterogeneidad metodológica y resultados contradictorios.** La comparación entre estudios se ve dificultada por la falta de estandarización en dosis, especies fúngicas, fuentes de ácido húmico y condiciones edáficas de partida. Esta heterogeneidad explica, en parte, hallazgos aparentemente contradictorios como los de [22], quienes no encontraron beneficios sinérgicos entre micorrizas y enmiendas orgánicas, en contraste con la mayoría de estudios que sí reportan sinergias positivas; o los de [50], que documentaron una pérdida de efectividad de los bioefectores en evaluaciones de largo plazo.

5. **Escasa evaluación de la persistencia temporal del efecto.** La gran mayoría de los estudios revisados evalúan respuestas de corto plazo (una temporada de cultivo), existiendo muy poca evidencia sobre la persistencia de los beneficios de estos bioestimulantes en ciclos de cultivo sucesivos o sobre su efecto acumulativo en la fertilidad del suelo a mediano y largo plazo.

Estos vacíos constituyen, en conjunto, la base argumentativa central para justificar la pertinencia y necesidad de investigación primaria sobre el efecto combinado de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos en el cultivo de maíz bajo condiciones amazónicas específicas.

4. DISCUSIÓN

Sección	Descripción
Introducción del hallazgo principal	La mayoría de los estudios analizados coinciden en que tanto las micorrizas arbusculares como los ácidos húmicos generan efectos positivos sobre el crecimiento, la nutrición y el rendimiento del maíz, con una magnitud de respuesta que depende fuertemente de la fertilidad basal del suelo: el beneficio es mayor en suelos ácidos y pobres en fósforo [3], [21], condición que coincide con la de los suelos amazónicos. Asimismo, los seis estudios que evaluaron explícitamente la combinación de ambos bioestimulantes [9], [10], [11], [51], [52], [60] reportan de manera consistente efectos aditivos o sinérgicos, lo que constituye el principal hallazgo que sustenta la hipótesis central de esta revisión.
Análisis de la literatura	Los estudios revisados abordan el problema desde tres enfoques complementarios. Un primer grupo, mayoritario, evalúa efectos agronómicos convencionales biomasa, altura, rendimiento bajo condiciones de fertilidad contrastante [15], [16], [18]. Un segundo grupo, de aparición más reciente (2022–2026), profundiza en mecanismos fisiológicos y moleculares mediante herramientas transcriptómicas y metabolómicas [53], [54], [56], [57], [76], lo que ha permitido pasar de documentar *que* estos bioestimulantes funcionan a explicar *cómo* lo hacen. Un tercer grupo enfoca su análisis en la mitigación de estrés abiótico sequía, salinidad, metales pesados como criterio de eficacia [64], [65], [66], [71], [77], un enfoque que resulta especialmente pertinente para las condiciones amazónicas. Los tres enfoques son convergentes en sus conclusiones generales, pero divergen en el nivel de evidencia que aportan: mientras los estudios agronómicos documentan el efecto, los mecanísticos lo explican y los de estrés abiótico lo condicionan.

Comparación con la literatura previa	Los hallazgos de esta revisión amplían, más que contradicen, la literatura previa sobre biofertilización de maíz. La relación inversa entre fertilidad de fósforo y beneficio micorrízico documentada por [3] confirma un patrón ya reportado en la literatura clásica sobre simbiosis micorrízica, y esta revisión aporta evidencia actualizada (2020–2026) que lo sostiene en un rango amplio de condiciones edáficas. Sin embargo, no toda la evidencia reciente es consistente: el hallazgo de [22] ausencia de beneficios complementarios entre micorrizas y enmiendas orgánicas contradice directamente la tendencia predominante, al igual que el reporte de [50] sobre la pérdida de efectividad de los bioefectores en el largo plazo. Estas discrepancias no invalidan la tendencia general, pero advierten contra una lectura excesivamente optimista o universal de los beneficios reportados.
Identificación de brechas	La revisión permite identificar una falta de consenso clara en dos aspectos: (i) la naturaleza exacta de la interacción combinada aditiva, sinérgica o independiente, dado que [52] reportan mejoras agronómicas sin cambios en la colonización micorrízica, sugiriendo vías de acción parcialmente independientes; y (ii) la persistencia temporal del efecto, evaluada en muy pocos estudios más allá de una temporada de cultivo. A esto se suma la ausencia total de estudios primarios en condiciones amazónicas específicas, siendo China, Brasil, Italia, Marruecos e Indonesia los principales aportantes de evidencia. Estas brechas sugieren como dirección futura prioritaria el diseño de ensayos de campo combinados (micorriza + ácido húmico), con seguimiento multianual, realizados directamente en suelos ácidos de baja fertilidad representativos de la Amazonía.
Limitaciones de la revisión	Esta revisión presenta limitaciones que deben reconocerse. Primero, la búsqueda se restringió a la base de datos Scopus y a los idiomas inglés y español, lo que pudo excluir literatura relevante indexada en otras bases (por ejemplo, WoS, SciELO o Redalyc) o publicada en portugués, idioma predominante en gran parte de la investigación agrícola amazónica brasileña. Segundo, los criterios de inclusión exigieron reportar variables de respuesta específicas, lo que pudo excluir estudios cualitativos o de enfoque exclusivamente edafológico con relevancia indirecta para el tema. Tercero, la heterogeneidad metodológica entre los 76 estudios en dosis, cepas fúngicas, fuentes de ácido húmico y diseño experimental limita la posibilidad de realizar una síntesis cuantitativa (meta-análisis) y obliga a una interpretación cualitativa de los hallazgos, con el grado de subjetividad que ello implica.
Implicaciones prácticas o teóricas	A nivel teórico, esta revisión refuerza la plausibilidad biológica de que las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos actúan mediante mecanismos complementarios exploración física del suelo, activación enzimática y reprogramación hormonal cuya relevancia se maximiza precisamente en las condiciones edáficas limitantes que caracterizan a la Amazonía. A nivel práctico, los hallazgos ofrecen una base para el diseño de estrategias de manejo agronómico de bajo costo e insumos locales (compost, ácido húmico de origen orgánico, inóculo micorrízico) orientadas a productores de agricultura familiar amazónica con acceso restringido a fertilizantes minerales, contribuyendo potencialmente a la seguridad alimentaria regional sin incrementar la presión sobre los ecosistemas forestales circundantes.
Conclusión final	En síntesis, la evidencia revisada respalda de forma consistente aunque todavía parcial el potencial de la aplicación combinada de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos como estrategia agronómica sostenible para el maíz, con una plausibilidad biológica particularmente alta para suelos ácidos y de baja fertilidad como los amazónicos. No obstante, la ausencia de estudios primarios realizados directamente en la región constituye la principal limitación para trasladar estas conclusiones de la plausibilidad a la certeza, y define con claridad la agenda de investigación necesaria para dar el siguiente paso en este campo.

5. CONCLUSIONES

La presente revisión bibliográfica permitió analizar la evidencia científica publicada entre 2020 y 2026 sobre el efecto combinado de las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos en el crecimiento del maíz (*Zea mays* L.). Los estudios revisados indican que ambos bioestimulantes, aplicados de forma individual o combinada, favorecen de manera consistente el crecimiento, la absorción de nutrientes y el rendimiento del cultivo, especialmente en suelos ácidos y con baja disponibilidad de fósforo, condiciones similares a las que caracterizan gran parte de la región amazónica.

La evidencia analizada muestra que la interacción entre micorrizas arbusculares y ácidos húmicos puede generar efectos aditivos o sinérgicos mediante mecanismos complementarios relacionados con el incremento de la exploración radicular, la mejora de la disponibilidad de nutrientes y la activación de procesos fisiológicos que favorecen el desarrollo vegetal. No obstante, el reducido número de investigaciones que evalúan simultáneamente ambos bioestimulantes y la heterogeneidad metodológica de los estudios limitan la posibilidad de establecer conclusiones definitivas sobre la magnitud de esta interacción.

Como principal contribución, esta revisión sistematiza la evidencia científica reciente sobre el uso combinado de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos en el cultivo de maíz, identificando las principales tendencias de investigación, los avances alcanzados y las brechas de conocimiento existentes. Entre estas destacan la ausencia de estudios realizados en condiciones amazónicas, la escasa evaluación de los efectos a largo plazo y la necesidad de estandarizar metodologías experimentales que permitan comparar resultados entre diferentes investigaciones.

En consecuencia, se recomienda que futuras investigaciones desarrollen ensayos de campo bajo condiciones edafoclimáticas representativas de la Amazonía, incorporando evaluaciones de largo plazo y protocolos experimentales estandarizados que permitan validar el potencial agronómico de la aplicación combinada de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos como estrategia sostenible para el cultivo de maíz.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Campus Orellana, por el apoyo académico y el acceso a los recursos bibliográficos que hicieron posible el desarrollo de esta revisión bibliográfica. También agradecen a los docentes e investigadores que han contribuido al fortalecimiento de este trabajo a través de su liderazgo y contribuciones académicas. También agradecemos a los autores del estudio discutido cuyas contribuciones forman la base científica que apoyó el análisis y la síntesis de la evidencia presentada en esta revisión.

7. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] N. Sarwar, "Response of hybrid maize to multiple soil organic amendments under sufficient or deficient soil zinc situation," Asian Journal of Agriculture and Biology, vol. 8, no. 1, pp. 38–43, Feb. 2020, doi: 10.35495/ajab.2019.07.332.

[2] V. Skliar, K. Kyrylchuk, I. Zubtsova, A. Novikova, and S. Yaroshchuk, "Application of biostimulants in agriculture: Effects on plant growth and yield," Scientific Horizons, vol. 27, no. 9, pp. 73–85, Aug. 2024, doi: 10.48077/scihor9.2024.73.

[3] Z. Qin et al., "Soil phosphorus availability modifies the relationship between AM fungal diversity and mycorrhizal benefits to maize in an agricultural soil," Soil Biol. Biochem., vol. 144, p. 107790, May 2020, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107790.

[4] L. P. Canellas, N. A. Canellas, F. Val, R. Spaccini, P. Mazzei, and F. L. Olivares, "Changes in Amino Acids Profile and Uptake on Maize Seedlings Treated with Protein Hydrolysates and Humic Substances," Nitrogen, vol. 5, no. 2, pp. 439–454, May 2024, doi: 10.3390/nitrogen5020028.

[5] L. P. Canellas, N. O. A. Canellas, L. E. S. da S. Irineu, F. L. Olivares, and A. Piccolo, "Plant chemical priming by humic acids," Chemical and Biological Technologies in Agriculture, vol. 7, no. 1, p. 12, Dec. 2020, doi: 10.1186/s40538-020-00178-4.

[6] D. Savy, Y. Brostaux, V. Cozzolino, P. Delaplace, P. du Jardin, and A. Piccolo, "Quantitative Structure-Activity Relationship of Humic-Like Biostimulants Derived From Agro-Industrial Byproducts and Energy Crops," Front. Plant Sci., vol. 11, May 2020, doi: 10.3389/fpls.2020.00581.

[7] N. Valero, Y. Ustates, and M. Pantoja-Guerra, "Biostimulant activity of humic acids derived from goat manure vermicompost and lignite in relation to their structure and interaction with a PGPR strain under semiarid conditions," Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, vol. 17, no. 2, May 2023, doi: 10.17584/rcch.2023v17i2.15956.

[8] N. O. V. Valero, "Low rank coal as a soil amendment and early growth stimulator of maize," vol. 19, no. 2, pp. 84–102, 2024, [Online]. Available: https://www.scopus.com/pages/publications/85216857455?origin=resultslist

[9] C. Gao, A. M. El-Sawah, D. F. I. Ali, Y. Alhaj Hamoud, H. Shaghaleh, and M. S. Sheteiwy, "The Integration of Bio and Organic Fertilizers Improve Plant Growth, Grain Yield, Quality and Metabolism of Hybrid Maize (Zea mays L.)," Agronomy, vol. 10, no. 3, p. 319, Feb. 2020, doi: 10.3390/agronomy10030319.

[10] V. Cozzolino, H. Monda, D. Savy, V. Di Meo, G. Vinci, and K. Smalla, "Cooperation among phosphate-solubilizing bacteria, humic acids and arbuscular mycorrhizal fungi induces soil microbiome shifts and enhances plant nutrient uptake," Chemical and Biological Tech-

nologies in Agriculture, vol. 8, no. 1, p. 31, Jun. 2021, doi: 10.1186/s40538-021-00230-x.

[11] M. SEMBIRING, T. SABRINA, and M. MUKHLIS, "Effect of soil conditioner enriched with biofertilizers to improve soil fertility and maize (Zea mays L.) growth on andisols Sinabung area," Acta Agric. Slov., vol. 116, no. 2, Dec. 2020, doi: 10.14720/aas.2020.116.2.1322.

[12] R. Ouhaddou et al., "Investigation of the impact of dual inoculations of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria on drought tolerance of maize grown in a compost-amended field under Mediterranean conditions," Front. Microbiol., vol. 15, Oct. 2024, doi: 10.3389/fmicb.2024.1432637.

[13] Y. Yuan et al., "Applying a combination of artificial humic acid and microbial agent to increase rhizosphere soil organic carbon content and maize yield," Plant Soil, vol. 518, no. 2, pp. 1089–1106, Jan. 2026, doi: 10.1007/s11104-025-08049-3.

[14] M. J. Page et al., "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," BMJ, p. n71, Mar. 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.

[15] El Gabardi S. et al., "Effects of phospho-compost and mud from phosphate sludges combined or not with an endomycorrhizal inoculum on the improvement of the agronomic parameters of maize (Zea mays L.) plants," vol. 21, no. 35–36, pp. 65–80, 2020, [Online]. Available: https://www.scopus.com/pages/publications/85092926369?origin=resultslist

[16] A. Feilinezhad, M. Mirzaeiheydari, F. Babaei, A. Maleki, and M. Rostaminya, "The Effect of Tillage, Organic Matter and Mycorrhizal Fungi on Efficiency and Productivity Use of Nutrients in Maize," Commun. Soil Sci. Plant Anal., vol. 53, no. 20, pp. 2719–2733, Nov. 2022, doi: 10.1080/00103624.2022.2072869.

[17] F. Yao et al., "Addition of organic amendments derived from invasive apple snails alleviated soil acidification, improved soil nitrogen and phosphorus effectiveness, microbial growth and maize yield in South China," Environ. Technol. Innov., vol. 33, p. 103475, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.eti.2023.103475.

[18] B. Zenebe, B. Dobo, and K. Woliy, "The Influence of Biochar, Organic and Inorganic Fertilizers, and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation on Maize Crop Performance Under Normal and Water-Stressed Conditions," Advances in Agriculture, vol. 2024, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.1155/2024/4934523.

[19] T. Nurhidayati et al., "The Effect of Mycorrhiza and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Supplementation on Zea mays saccharata Sturt. Growth and Productivity Grown on Low Nutrients Soil," Nature Environment and Pollution Technology, vol. 23, no. 3, pp. 1449–1459, Sep. 2024, doi: 10.46488/NEPT.2024.v23i03.015.

[20] W. Astiko, M. T. Fauzi, L. E. Susilowati, L. Zulkifli, and Fahrurozi, "Improving Nitrogen Availability and Crop Productivity Using Bioameliorants in Maize–Soybean Intercropping on Suboptimal Land," Nitrogen, vol. 6, no. 4, p. 89, Oct. 2025, doi: 10.3390/nitrogen6040089.

[21] A. I. Raya-Hernández, P. F. Jaramillo-López, D. A. López-Carmona, T. Díaz, J. A. Carrera-Valtierra, and J. Larsen, "Field evidence for maize-mycorrhiza interactions in agroecosystems with low and high P soils under mineral and organic fertilization," Applied Soil Ecology, vol. 149, p. 103511, May 2020, doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103511.

[22] V. Marrassini, L. Ercoli, R. Cardelli, V. Cantini, and E. Pellegrino, "Lack of complementary or synergistic benefits of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and organic amendments but functional differentiation among AMF species in a maize–wheat rotation," Science of The Total Environment, vol. 1012, p. 181292, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.181292.

[23] I. Kakabouki, A. Efthimiadou, A. Folina, C. Zisi, and S. Karydogianni, "Effect of different tomato pomace compost as organic fertilizer in sweet maize crop," Commun. Soil Sci. Plant Anal., vol. 51, no. 22, pp. 2858–2872, Dec. 2020, doi: 10.1080/00103624.2020.1853148.

[24] M. Rafique, I. Ortas, M. Rizwan, H. J. Chaudhary, A. R. Gurmani, and M. F. Hussain Munis, "Residual effects of biochar and phosphorus on growth and nutrient accumulation by maize (Zea mays L.) amended with microbes in texturally different soils," Chemosphere, vol. 238, p. 124710, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124710.

[25] A. TANWAR, A. SİNGH, A. AGGARWAL, E. JANGRA, and S. T. PİCHARDO, "Evaluation of municipal sewage sludge for Arbuscular mycorrhizal fungi inoculum production," EURASIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE (EJSS), vol. 10, no. 4, pp. 343–353, Oct. 2021, doi: 10.18393/ejss.972157.

[26] C. A. Lagos, T. Díaz, E. Saucedo, C. Arriagada, J. Larsen, and P. F. Jaramillo-López, "Soil contamination with phenanthrene induces maize mycorrhiza growth su-

ppression," Rhizosphere, vol. 18, p. 100340, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.rhisph.2021.100340.

[27] F. C. Andrade, F. Fernandes, A. Oliveira Júnior, A. B. L. Rondina, M. Hungria, and M. A. Nogueira, "Enrichment of organic compost with beneficial microorganisms and yield performance of corn and wheat," Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. 25, no. 5, pp. 332–339, May 2021, doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v25n5p332-339.

[28] A. Wolna-Maruwka et al., "The Effect of Biochar-Based Organic Amendments on the Structure of Soil Bacterial Community and Yield of Maize (Zea mays L.)," Agronomy, vol. 11, no. 7, p. 1286, Jun. 2021, doi: 10.3390/agronomy11071286.

[29] M. J. Salomon et al., "Evaluation of commercial composts and potting mixes and their ability to support arbuscular mycorrhizal fungi with maize (Zea mays) as host plant," Waste Management, vol. 134, pp. 187–196, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.08.018.

[30] B. Thapa and J. Mowrer, "Effects of Carbon Amendments, Tillage and Cover Cropping on Arbuscular Mycorrhizal Fungi Association and Root Architecture in Corn and Cotton Crop Sequence," Agronomy, vol. 12, no. 9, p. 2185, Sep. 2022, doi: 10.3390/agronomy12092185.

[31] F. M. El-maghraby, E. M. Shaker, M. Elbagory, A. E.-D. Omara, and T. H. Khalifa, "The Synergistic Impact of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Compost Tea to Enhance Bacterial Community and Improve Crop Productivity under Saline–Sodic Condition," Plants, vol. 13, no. 5, p. 629, Feb. 2024, doi: 10.3390/plants13050629.

[32] F. Serrapica et al., "Sustainable Maize Forage Production: Effect of Organic Amendments Combined with Microbial Biofertilizers Across Different Soil Textures," Sustainability, vol. 17, no. 21, p. 9617, Oct. 2025, doi: 10.3390/su17219617.

[33] W. Dong et al., "Synergistic effects of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi on maize growth: Insights into nutrient uptake and microbial community shifts," Ind. Crops Prod., vol. 239, p. 122467, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.indcrop.2025.122467.

[34] A. D. FATAYA, W. S. DEWI, H. HADIWIYONO, and V. R. CAHYANI, "Effects of mycorrhizal inoculum, organic inputs, and carbofuran on maize growth in Alfisol," International Journal of Tropical Drylands, vol. 10, no. 1, Apr. 2026, doi: 10.13057/tropdrylands/t100101.

[35] L. A. Ulhoa, A. L. Boiça Júnior, J. A. Davis, and M. J. Stout, "Influence of mycorrhizae and silicon on maize and soybean resistance and tolerance to Spodoptera frugiperda (Lepidoptera: Noctuidae)," Journal of Insect Science, vol. 26, no. 2, Mar. 2026, doi: 10.1093/jisesa/ieag028.

[36] A. I. Abdo, E.-S. E. A. El-Sobky, and J. Zhang, "Optimizing maize yields using growth stimulants under the strategy of replacing chemicals with biological fertilizers," Front. Plant Sci., vol. 13, Nov. 2022, doi: 10.3389/fpls.2022.1069624.

[37] J. Izquierdo, O. Arriagada, G. García-Pintos, R. Ortiz, M. García-Pintos, and M. García-Pintos, "Humic field biostimulation as a sustainable agricultural practice to increase yield of main grains: evidence from on-farm trials," Front. Plant Sci., vol. 16, Dec. 2025, doi: 10.3389/fpls.2025.1709876.

[38] J. Song, B. Pi, J. Dai, Z. Nie, G. Yu, and W. Du, "Effects of humic acid on the growth and cadmium accumulation of maize (Zea mays L.) seedlings," Int. J. Phytoremediation, vol. 27, no. 7, pp. 888–895, Jun. 2025, doi: 10.1080/15226514.2025.2455483.

[39] J. F. Da Cunha Leme Filho et al., "An integrated plant nutrition system (IPNS) for corn in the Mid-Atlantic USA," J. Plant Nutr., vol. 44, no. 5, pp. 704–722, Mar. 2021, doi: 10.1080/01904167.2020.1849298.

[40] M. A. Baldotto, R. O. Melo, and L. B. Baldotto, "Initial development of maize in response to different periods of seed immersion in humic acid (HA)," Aust. J. Crop Sci., no. 15(10):2021, pp. 1259–1262, Oct. 2021, doi: 10.21475/ajcs.21.15.10.p3148.

[41] C. Savarese et al., "Bioactivity of two different humic materials and their combination on plants growth as a function of their molecular properties," Plant Soil, vol. 472, no. 1–2, pp. 509–526, Mar. 2022, doi: 10.1007/s11104-021-05267-3.

[42] Ł. Sobiech, M. Grzanka, R. Idziak, and A. Blecharczyk, "The Effect of Post-Emergence Application of Biostimulants and Soil Amendments in Maize Cultivation on the Growth and Yield of Plants," Plants, vol. 14, no. 9, p. 1274, Apr. 2025, doi: 10.3390/plants14091274.

[43] C. da S. Dias et al., "Biostimulant seed priming with humic acid followed by drying: A sustainable technique to enhance early growth of maize," Aust. J. Crop Sci., p. 1158, Dec. 2025, doi: 10.21475/ajcs.25.19.12.p61.

[44] C. N. Sible, J. S. Fender, and F. E. Below, "Soil-applied carbon-based biostimulants differentially affect maize and soybean grain yield and quality," Agrosystems, Geosciences & Environment, vol. 8, no. 4, Dec. 2025, doi: 10.1002/agg2.70281.

[45] K. KARABAYEV, B. SULEIMENOV, Y. SONGULOV, U. AKHMURZIN, and A. SMANOV, "Integrated application of granular and liquid bioorganic fertilizers improves corn productivity and soil fertility in light chestnut soils," Cell Biology and Development, vol. 9, no. 1, Aug. 2025, doi: 10.13057/cellbioldev/v090105.

[46] W. Huo et al., "Efficient Co-hydrothermal conversion of corn straw and pig manure into nitrogen-enriched soluble humic acid fertilizer," J. Environ. Manage., vol. 408, p. 129976, May 2026, doi: 10.1016/j.jenvman.2026.129976.

[47] K. Kurniati et al., "Effects of agromineral and biostimulant applications on nutrient uptake in corn (Zea mays L.)," Journal of Ecological Engineering, vol. 27, no. 2, pp. 16–26, Feb. 2026, doi: 10.12911/22998993/210647.

[48] G. Saparov et al., "Integrated Assessment of Vermiculite Enriched with Humic Substances or Chlorella vulgaris: Soil Fertility, Maize Nutrition, and Microbial Indicators," Agriculture, vol. 16, no. 6, p. 712, Mar. 2026, doi: 10.3390/agriculture16060712.

[49] A. G. Oktem, "Foliar Application of Amino Acids Mitigate High-Temperature Stress and Improve Yield, Quality, and Physiological Responses of Maize," Int. J. Plant Prod., vol. 20, no. 3, p. 65, Sep. 2026, doi: 10.1007/s42106-026-00447-6.

[50] S. Symanczik, C. Lipp, P. Mäder, C. Thonar, and D. Kundel, "Limited effectiveness of selected bioeffectors combined with recycling phosphorus fertilizers for maize cultivation under Swiss farming conditions," Front. Plant Sci., vol. 14, Aug. 2023, doi: 10.3389/fpls.2023.1239393.

[51] D. Qiao, A. Borundia, C. Cruz, and A. M. Mouazen, "Impacts of carbon-rich amendments and bio-stimulants in subsoil on fodder maize productivity," Field Crops Res., vol. 337, p. 110239, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.fcr.2025.110239.

[52] M. Ou-Zine, R. El Hilali, A. Haggoud, E. H. Achbani, and R. Bouamri, "Effects and Relationships of Compost Dose and Organic Additives on Compost Tea Properties, Efficacy Against Fusarium oxysporum and Potential Effect on Endomycorrhization and Growth of Zea mays L.," Waste Biomass Valorization, vol. 13, no. 11, pp. 4431–4445, Nov. 2022, doi: 10.1007/s12649-022-01795-w.

[53] T. Vujinović et al., "Biostimulant Action of Dissolved Humic Substances From a Conventionally and an Organically Managed Soil on Nitrate Acquisition in Maize Plants," Front. Plant Sci., vol. 10, Jan. 2020, doi: 10.3389/fpls.2019.01652.

[54] V. Santoro et al., "Phosphorus Acquisition Efficiency and Transcriptomic Changes in Maize Plants Treated with Two Lignohumates," Plants, vol. 12, no. 18, p. 3291, Sep. 2023, doi: 10.3390/plants12183291.

[55] V. R. Cahyani, N. Y. Azzahra, and R. Rosariastuti, "Evaluation of Arbuscular Mycorrhizal Cultures in Increasing Phosphorus Uptake and Maize Growth Compared to Chemical and Organic Fertilizers on an Andisol," AGRIVITA Journal of Agricultural Science, vol. 46, no. 3, pp. 439–457, Oct. 2024, doi: 10.17503/agrivita.v46i3.3867.

[56] Y. Wang et al., "Analysis of the molecular composition of humic substances and their effects on physiological metabolism in maize based on untargeted metabolomics," Front. Plant Sci., vol. 14, May 2023, doi: 10.3389/fpls.2023.1122621.

[57] F. Yang et al., "Artificial humic acid promotes growth of maize seedling under alkali conditions," Environmental Pollution, vol. 327, p. 121588, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121588.

[58] B. Li, D. Song, T. Guo, X. Xu, C. Ai, and W. Zhou, "Combined physiological and metabolomic analysis reveals the effects of different biostimulants on maize production and reproduction," Front. Plant Sci., vol. 13, Nov. 2022, doi: 10.3389/fpls.2022.1062603.

[59] L. Archana Devi et al., "Exogenous Soil Drenching Supplementation of Fluvic Acid Enhances Growth Promotion in Maize (Zea mays L.)," Russian Journal of Plant Physiology, vol. 72, no. 6, p. 198, Dec. 2025, doi: 10.1134/S1021443725604239.

[60] M. S. Sheteiwy et al., "Sugar metabolism and metabolite profiling of maize grains are largely improved by the combination of arbuscular mycorrhizal fungi and humic acid," Ind. Crops Prod., vol. 234, p. 121546, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.indcrop.2025.121546.

[61] J. S. Bamboriya et al., "Monitoring the effect of integrated nutrient management practices on soil health in maize-based cropping system," Front. Sustain. Food Syst., vol. 7, Sep. 2023, doi: 10.3389/fsufs.2023.1242806.

[62] R. Ablimit et al., "Altering microbial community for improving soil properties and agricultural sustainability during a 10-year maize-green manure intercropping in Northwest China," J. Environ. Manage., vol. 321, p. 115859, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115859.

[63] A. C. Souza et al., "Acclimation with humic acids enhances maize and tomato tolerance to salinity," Chemical and Biological Technologies in Agriculture, vol. 8, no. 1, p. 40, Dec. 2021, doi: 10.1186/s40538-021-00239-2.

[64] M. E. Abu-Ria, W. M. Shukry, S. A. Abo-Hamed, F. Ibraheem, and E. M. Elghareeb, "Differential Physiological Responses of Zea mays and Sorghum bicolor to Drought Stress: Insights into the Ameliorative Role of Humic Acid at the Reproductive and Yield Stages," J. Plant Growth Regul., vol. 44, no. 10, pp. 6061–6082, Oct. 2025, doi: 10.1007/s00344-025-11813-5.

[65] M. E. Abu-Ria, E. M. Elghareeb, W. M. Shukry, S. A. Abo-Hamed, and F. Ibraheem, "Mitigation of drought stress in maize and sorghum by humic acid: differential growth and physiological responses," BMC Plant Biol., vol. 24, no. 1, p. 514, Jun. 2024, doi: 10.1186/s12870-024-05184-4.

[66] E. A. Alsherif, O. Almaghrabi, A. M. Elazzazy, M. Abdel-Mawgoud, G. T. S. Beemster, and H. AbdElgawad, "Carbon nanoparticles improve the effect of compost and arbuscular mycorrhizal fungi in drought-stressed corn cultivation," Plant Physiology and Biochemistry, vol. 194, pp. 29–40, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.plaphy.2022.11.005.

[67] E. A. Alsherif et al., "How Carbon Nanoparticles, Arbuscular Mycorrhiza, and Compost Mitigate Drought Stress in Maize Plant: A Growth and Biochemical Study," Plants, vol. 11, no. 23, p. 3324, Dec. 2022, doi: 10.3390/plants11233324.

[68] R. Ouhaddou et al., "Enhancing Maize Productivity and Soil Health under Salt Stress through Physiological Adaptation and Metabolic Regulation Using Indigenous Biostimulants," Plants, vol. 12, no. 21, 2023, doi: 10.3390/plants12213703.

[69] J. L. A. Santos et al., "Alkaline extract from vermicompost reduced the stress promoted by As on maize plants and increase their phytoextraction capacity," Environmental Science and Pollution Research, vol. 29, no. 14, pp. 20864–20877, Mar. 2022, doi: 10.1007/s11356-021-17255-2.

[70] Q. Jia, J. Sun, Q. Gan, N.-N. Shi, and S. Fu, "Zea mays cultivation, biochar, and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation influenced lead immobilization," Microbiol. Spectr., vol. 12, no. 4, Apr. 2024, doi: 10.1128/spectrum.03427-23.

[71] F. Ahmadi, S. H. Sarghin, A. Siosemardeh, and W. Weisany, "Mitigating exogenous cobalt-induced stress in maize plants with biochar and arbuscular mycorrhizal fungi (Rhizophagus intraradices)," Acta Physiol. Plant., vol. 47, no. 9, p. 85, Sep. 2025, doi: 10.1007/s11738-025-03831-3.

[72] L. Ech-Chatir et al., "CO-INOCULATION Of COMPOST WITH ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI AND ENDOPHYTIC BACTERIA TO ALLEVIATE THE ADVERSE IMPACT OF DROUGHT STRESS IN MAIZE," Pak. J. Bot., vol. 57, no. 4, pp. 1255–1271, 2025, doi: 10.30848/PJB2025-4(21).

[73] K. D. Alotaibi, "Interactive effects of arbuscular mycorrhizal fungi and organic amendments on maize growth under salinity stress," Front. Plant Sci., vol. 17, Mar. 2026, doi: 10.3389/fpls.2026.1638742.

[74] Y. Bouhia, M. Hafidi, Y. Ouhdouch, M. E. M. El Boukhari, Y. Zeroual, and K. Lyamlouli, "Effect of the co-application of olive waste-based compost and biochar on soil fertility and zea mays agrophysiological traits," International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, vol. 10, no. 2, pp. 111–127, 2021, doi: 10.30486/ijrowa.2021.1906342.1115.

[75] Q. Liu et al., "Impact of Particle Size on the Aerobic Decomposition and Fertilizer Efficiency of Corn Cobs: A Sustainable Waste-to-Resource Approach," Biology (Basel)., vol. 14, no. 11, p. 1610, Nov. 2025, doi: 10.3390/biology14111610.

[76] R. B. Guidinelle et al., "Impact of historical soil management on the interaction of plant-growth-promoting bacteria with maize (Zea mays L.)," Heliyon, vol. 10, no. 7, p. e28754, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28754.

[77] K. Othibeng et al., "A Metabolic Choreography of Maize Plants Treated with a Humic Substance-Based Biostimulant under Normal and Starved Conditions," Metabolites, vol. 11, no. 6, p. 403, Jun. 2021, doi: 10.3390/metabo11060403.