SCIENTIA AGROPECUARIA

Scientia Agropecuaria

Web page: http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Trujillo

RESEARCH ARTICLE

Native arbuscular mycorrhizal fungi in tropical agroecosystems: Agronomic evidence, bioeconomic potential and research gaps in Ecuador

Hongos micorrízicos arbusculares nativos en agroecosistemas tropicales: Evidencia agronómica, potencial bioeconómico y brechas de investigación en Ecuador

Jaime Naranjo-Moran[1]*; Gabriela Dau-Jarama[2]; Jairo Jaime-Carvajal[1]; José Luis Ballesteros-Lara[1]

[1] Universidad Politécnica Salesiana, Grupo de Investigaciones en Aplicaciones Biotecnológicas, Carrera de Biotecnología, Campus María Auxiliadora, Guayaquil, Ecuador.

[2] Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Economía, Campus María Auxiliadora, Guayaquil, Ecuador.

* Corresponding author: jnaranjo@ups.edu.ec (J. Naranjo-Moran).

Received: 24 September 2026. Accepted: 3 November 2026. Published: 12 November 2026.

Abstract

Native consortia of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) have been proposed as bio-inputs for low-fertility tropical soils. This systematized review examined which agronomic, ecological and economic evidence supports their use in tropical agroecosystems and which gaps limit it in Ecuador. Scopus, Web of Science and PubMed (2005–2026) and reference lists were searched; selection was reported following PRISMA 2020 and quality was appraised with Joanna Briggs Institute (JBI) checklists. Of 361 records, 234 were screened and, of 92 potentially eligible reports, 13 were assessed in full text. Twenty-five studies were included (11 from the databases and 14 from reference lists): 14 inoculation trials, 10 community studies and one review of mechanisms. Of the 24 primary studies, 19 were rated high quality, and 13 trials did not measure the response before inoculation. The four field trials recorded yield or nutritional gains over uninoculated controls. Two Ecuadorian greenhouse trials compared native inocula with commercial or exotic ones, with results favourable or equivalent to the native inoculum; no study made that comparison in the field or reported economic indicators. The three Ecuadorian field trials identified used imported inoculants, and of the twelve Ecuadorian studies included only one analysed soil from Amazonian agroecosystems. We propose a biotechnological sovereignty framework, a verifiable sequence from molecular identification to agronomic validation, and a phased route. Moving from potential resource to bioeconomic asset requires multi-season field trials that compare native consortia with commercial inoculants and record costs and benefits.

Keywords: arbuscular mycorrhizal fungi; native inoculants; bioeconomy; ecosystem services; tropical agriculture; Ecuador.

Resumen

Los consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) se proponen como bioinsumos para suelos tropicales de baja fertilidad. Esta revisión sistematizada examinó la evidencia agronómica, ecológica y económica sobre su uso en agroecosistemas tropicales y qué brechas lo limitan en Ecuador. Se consultaron Scopus, Web of Science y PubMed (2005–2026) y listas de referencias; la selección se reportó con PRISMA 2020 y la calidad, con listas del Joanna Briggs Institute (JBI). De 361 registros se cribaron 234 y, de 92 reportes potencialmente elegibles, se evaluaron 13 a texto completo. Se incluyeron 25 estudios (11 de las bases y 14 de listas de referencias): 14 ensayos de inoculación, 10 estudios de comunidades y una revisión de mecanismos. De los 24 primarios, 19 tuvieron calidad alta, y 13 ensayos no midieron la respuesta antes de inocular. Los cuatro ensayos de campo registraron mejoras de rendimiento o nutrición frente a testigos sin inocular. Dos ensayos de invernadero ecuatorianos compararon inóculos nativos con comerciales o exóticos, con resultados favorables o equivalentes; ningún estudio hizo esa comparación en campo ni reportó indicadores económicos. Los tres ensayos de campo ecuatorianos usaron inoculantes importados, y de los doce estudios ecuatorianos incluidos solo uno analizó suelos de agroecosistemas amazónicos. Proponemos un marco de soberanía biotecnológica, una secuencia verificable de la identificación molecular a la validación agronómica y una ruta por fases. Pasar de recurso potencial a activo bioeconómico exige ensayos de campo de varias campañas que comparen consorcios nativos con inoculantes comerciales y registren costos y beneficios.

Palabras clave: hongos micorrízicos arbusculares; inoculantes nativos; bioeconomía; servicios ecosistémicos; agricultura tropical; Ecuador.

DOI: https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2026.070

Cite this article:

Naranjo-Moran, J., Dau-Jarama, G., Jaime-Carvajal, J., & Ballesteros-Lara, J. L. (2026). Caracterización organoléptica del cacao ecuatoriano: una revisión de la influencia del genotipo, ambiente y manejo poscosecha. *Scientia Agropecuaria, 17*(4), 1079-1105.

1. Introducción

En las regiones tropicales y subtropicales, la degradación del suelo, el crecimiento de la población y el cambio climático obligan a producir con menos insumos (Akpodé et al., 2024). El uso continuo de agroquímicos afecta la salud del suelo y cambia la composición de su microbiota. Johnson (1993) mostró que la fertilización mineral puede seleccionar hongos micorrízicos arbusculares (HMA) menos benéficos para la planta, y ese resultado se integró después en el continuo mutualismo–parasitismo (Johnson et al., 1997). El efecto de la simbiosis tampoco es fijo. Depende de la fertilidad del suelo, del hospedador y del manejo (Hoeksema et al., 2010), por lo que la pérdida de beneficio bajo agricultura intensiva debe leerse como una tendencia probable y no como una regla.

La mayoría de las especies cultivadas forma micorrizas arbusculares (Smith & Read, 2008). La planta entrega fotosintatos y lípidos al hongo y recibe a cambio fósforo y otros nutrientes (Nagy et al., 2026; Rayo Sánchez & Avellaneda-Torres, 2022). El micelio extrarradical explora un volumen de suelo mayor que el de la raíz, interviene en las relaciones hídricas de la planta y ayuda a contener patógenos del suelo (De La Cruz et al., 2026). Muchos inoculantes comerciales o exóticos no rinden en campo lo esperado, en parte porque no están adaptados a las condiciones locales. Un metaanálisis reciente encontró que los productos de origen global se quedan por debajo de lo previsto (Koziol et al., 2025). Los aislados nativos, o adaptados al sitio, pueden comportarse mejor con calor, sequía o salinidad, aunque esa ventaja no aparece en todos los suelos. En sistemas forestales, hongos de origen local funcionaron en sinergia con sus hospedadores (Djotan et al., 2026); falta comprobar si ocurre lo mismo en cultivos anuales. En la planta, los HMA se han relacionado con ajuste osmótico, con mayor actividad de superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y ascorbato peroxidasa (APX), y con cambios en acuaporinas, ácido abscísico (ABA) y estrigolactonas, vinculados al uso del agua y a la tolerancia a sequía y salinidad (Boyno et al., 2025). Casi toda esta evidencia sale de invernadero o de ensayos controlados, así que su valor en campo todavía está por confirmar.

Usamos dos términos que conviene definir. Llamamos recurso bioeconómico a un componente biológico cuya función produce bienes o servicios con valor económico; en el caso de los HMA, el ahorro en fertilizantes y servicios como la agregación del suelo o la retención de carbono. Un recurso así puede manejarse dentro de una bioeconomía basada en recursos renovables. Hablamos de activo biocultural cuando la conservación y el uso de ese recurso dependen del conocimiento y las prácticas de las comunidades locales, de modo que su valor excede lo agronómico. Preferimos la expresión recurso bioeconómico potencial porque la evidencia disponible es sobre todo funcional y cualitativa, y los indicadores económicos todavía son escasos. Las definiciones operativas de HMA nativo, autóctono y adaptado al sitio se presentan en la sección 2.2.

Ecuador es un buen caso para aplicar estos conceptos. Costa, sierra y Amazonía tienen suelos y climas muy distintos, y sus comunidades de HMA también difieren. Se han estudiado en el bosque seco premontano del sur (Haug et al., 2021), en la Amazonía (Arévalo-Granda et al., 2023; Garcés-Ruiz et al., 2019), en cultivos como el cacao (Pacheco Flores de Valgaz et al., 2022) y en fincas andinas de maíz y papa, donde el cambio de uso del suelo modifica los patrones de diversidad asociados al clima (Stewart et al., 2026). Aun así, gran parte del territorio carece de caracterización molecular de estos hongos. Mucha diversidad con poca documentación deja al país sin la información que necesitaría para gobernar sus recursos genéticos del suelo.

La pregunta que guio la revisión fue: ¿qué evidencia agronómica, ecológica y económica permite tratar a los consorcios nativos de HMA como recursos bioeconómicos en agroecosistemas tropicales, y qué brechas impiden ese uso en Ecuador? De ella se derivan cuatro preguntas secundarias: (P1) ¿con qué nivel de evidencia (campo, invernadero o laboratorio) y con qué calidad metodológica se ha evaluado el desempeño de HMA nativos?; (P2) ¿qué beneficios agronómicos y económicos se han medido, cuáles se infieren y cuáles no se han cuantificado?; (P3) ¿cómo se distribuye en Ecuador la caracterización de comunidades de HMA y dónde están los vacíos?; y (P4) ¿qué condiciones técnicas, normativas y comunitarias requeriría un uso soberano de estos recursos?

El objetivo fue sistematizar la evidencia sobre los HMA nativos como recursos bioeconómicos y bioculturales potenciales en agroecosistemas tropicales para responder a esas preguntas. Las preguntas P1 a P3 se responden con los estudios incluidos. La P4 se aborda con un marco de soberanía biotecnológica para Ecuador que es una propuesta de los autores y que se presenta separada de los resultados de la revisión (secciones 3.9 a 3.12).

2. Metodología

2.1. Diseño de la revisión y pregunta estructurada. Se trata de una revisión sistematizada de literatura; no generamos datos experimentales. La identificación, el cribado y la inclusión de estudios se reportan siguiendo la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021), y la calidad de los estudios primarios se evaluó con las herramientas de evaluación crítica del Joanna Briggs Institute (JBI). El protocolo no se registró antes de iniciar la búsqueda. Como la pregunta abarca intervenciones (inoculación) y exposiciones (manejo y uso del suelo), la estructuramos con el esquema población, intervención o exposición, comparador y resultados (PICO/PECO) por separado para cada tipo de evidencia (Tabla 1).

2.2. Definiciones operativas. Consideramos HMA nativo el aislado o consorcio obtenido del suelo o de las raíces del mismo sitio, o de la misma ecorregión y tipo de suelo, donde luego se aplica o se estudia. Tratamos como sinónimos de nativo los términos autóctono e indígena cuando los autores originales los usan con ese sentido. Un HMA adaptado al sitio es un aislado de otra localidad con condiciones edafoclimáticas comparables (clima, pH y disponibilidad de fósforo) cuya colonización o efecto se comprobó en el sitio de destino. Un inoculante comercial no adaptado es un producto de origen geográfico distinto al del sitio de aplicación, o no declarado, producido fuera de la región. Cuando un estudio no informó el origen del inóculo, se registró como origen no declarado y no se usó para comparar HMA nativos con comerciales.

2.3. Estrategia de búsqueda. Buscamos el 25 de octubre de 2026 en Scopus, Web of Science Core Collection y PubMed documentos publicados desde el 1 de enero de 2005. La ecuación combinó cinco bloques de términos: la simbiosis (arbuscular mycorrhiza, AM fungi, AMF, Glomeromycota), el origen del inóculo (native, indigenous, autochthonous, locally adapted), el tipo de estudio (inoculación, consorcios, biofertilizantes, comunidades, diversidad), el sistema productivo (agricultura, cultivo, agroecosistema, agroforestería, finca, plantación, huerto) y el ámbito geográfico (trópico, neotrópico, Ecuador, Amazonía, Andes). Una segunda rama recuperó cualquier estudio sobre micorrizas en Ecuador. Las ecuaciones se ejecutaron como se transcriben a continuación.

Scopus (TITLE-ABS-KEY, búsqueda avanzada; 206 registros): TITLE-ABS-KEY(("arbuscular mycorrhiz*" OR "AM fung*" OR amf OR glomeromycot*) AND (native OR indigenous OR autochthonous OR "locally adapted") AND (inocul* OR bioinoculant* OR consorti* OR biofertili* OR communit* OR diversit*) AND (agricultur* OR crop* OR agroecosystem* OR agroforest* OR farm* OR plantation* OR orchard*) AND (tropic* OR neotropic* OR ecuador* OR amazon* OR andes OR andean)) OR TITLE-ABS-KEY(mycorrhiz* AND ecuador*)

Web of Science Core Collection (Topic, búsqueda por campos; 96 registros): ("arbuscular mycorrhiza" OR "arbuscular mycorrhizal" OR "arbuscular mycorrhizae" OR "AM fungi" OR "AM fungus" OR AMF OR glomeromycot*) AND (native OR indigenous OR autochthonous OR "locally adapted") AND (inocul* OR bioinoculant* OR consorti* OR biofertili* OR communit* OR diversit*) AND (agricultur* OR crop* OR agroecosystem* OR agroforest* OR farm* OR plantation* OR orchard*) AND (tropic* OR neotropic* OR ecuador* OR amazon* OR andes OR andean)

PubMed (título y resumen; 59 registros): ((("arbuscular mycorrhiza"[tiab] OR "arbuscular mycorrhizal"[tiab] OR "arbuscular mycorrhizae"[tiab] OR "AM fungi"[tiab] OR "AM fungus"[tiab] OR AMF[tiab] OR glomeromycot*[tiab]) AND (native[tiab] OR indigenous[tiab] OR autochthonous[tiab] OR "locally adapted"[tiab]) AND (inocul*[tiab] OR bioinoculant*[tiab] OR consorti*[tiab] OR biofertili*[tiab] OR communit*[tiab] OR diversit*[tiab]) AND (agricultur*[tiab] OR crop*[tiab] OR agroecosystem*[tiab] OR agroforest*[tiab] OR farm*[tiab] OR plantation*[tiab] OR orchard*[tiab]) AND (tropic*[tiab] OR neotropic*[tiab] OR ecuador*[tiab] OR amazon*[tiab] OR andes[tiab] OR andean[tiab])) OR (mycorrhiz*[tiab] AND ecuador*[tiab])) AND ("2005/01/01"[dp] : "2026/10/25"[dp]) AND (english[la] OR spanish[la])

En Web of Science se ejecutó el bloque principal sin la rama sobre Ecuador, con los filtros de años de publicación 2005–2026 e idioma inglés o español; los 96 registros exportados cumplen ambos criterios (92 en inglés y 4 en español, publicados entre 2013 y 2026). En PubMed la fecha y el idioma forman parte de la ecuación. En Scopus no se aplicaron filtros, por lo que sus 13 registros anteriores a 2005 se eliminaron antes del cribado; el idioma y el tipo de documento se evaluaron en el cribado. El historial de búsqueda y las exportaciones se presentan en la Tabla S1. Revisamos además las listas de referencias de los estudios incluidos y los trabajos que los citan, que aportaron 14 estudios (Figura 1). Mantuvimos algunas referencias anteriores a 2005 porque sostienen el marco conceptual de la simbiosis y del continuo mutualismo–parasitismo (Johnson, 1993; Johnson et al., 1997; Smith & Read, 2008); no forman parte de la síntesis.

2.4. Criterios de elegibilidad por tipo de evidencia. Los registros se revisaron por título, resumen y texto completo. Se aceptaron documentos en inglés o español publicados entre 2005 y 2026. Como los estudios responden a preguntas distintas, definimos criterios de elegibilidad separados para cuatro tipos de evidencia: agronómica y funcional (ensayos de inoculación), ecológica y molecular (estudios de comunidades), de mecanismos (revisiones de ensayos controlados) y económica (Tabla 1).

La Tabla 1 indica también la herramienta JBI y la versión que corresponde a cada diseño. Las comparaciones y conclusiones se hicieron dentro de cada tipo de evidencia: no contrastamos el efecto de un ensayo de inoculación con una asociación observada en un estudio de comunidades.

El criterio de origen tropical se aplicó de forma estricta a los estudios de comunidades. En los ensayos de inoculación se admitieron estudios extratropicales cuando aportaban un resultado sobre un servicio o una respuesta de la planta que no se había evaluado en ensayos tropicales; se identifican en la Tabla 2 y no se usan para conclusiones sobre el desempeño de HMA en suelos tropicales. Tres ensayos usaron inóculo que no es nativo del sitio de aplicación. Los dos de invernadero o mesocosmos aplicaron *Rhizophagus intraradices* adquirido en la Universidad de Changjiang sobre suelo natural esterilizado (Xia et al., 2023; Yue et al., 2026); los admitimos porque la Tabla 1 excluye los sustratos inertes y no el suelo natural esterilizado, pero solo como evidencia de servicios (tolerancia al cromo y efecto sobre nematodos). El ensayo de campo de Marrassini et al. (2026), hecho en Pisa (Italia), usó aislados de *Funneliformis mosseae* y *Archaeospora trappei* obtenidos de pastizales calcáreos de Limburgo, en los Países Bajos (Marrassini et al., 2024), y se usa para discutir la dependencia del contexto y la persistencia del efecto. Ninguno de los tres entra en la comparación entre HMA nativos y comerciales. Ningún estudio con datos económicos primarios cumplió los criterios, por lo que la evidencia económica de la sección 3.8 procede de fuentes de contexto, identificadas como tales.

2.5. Selección de estudios. Las tres bases devolvieron 361 registros: 206 de Scopus, 96 de Web of Science y 59 de PubMed (Figura 1). Antes del cribado se eliminaron 114 duplicados y 13 registros de Scopus anteriores a 2005.

Tabla 1
Pregunta estructurada (PICO/PECO), criterios de elegibilidad y herramienta JBI por tipo de evidencia

Componente	Agronómica y funcional (ensayos de inoculación)	Ecológica y molecular (estudios de comunidades)	Mecanismos	Económica
Población	Cultivos o plantas hospedadoras en suelo natural	Comunidades de HMA en suelos y raíces de agroecosistemas tropicales y de vegetación de referencia	Plantas micorrizadas bajo estrés	Sistemas productivos que usan inoculantes de HMA
Intervención o exposición	Inoculación con HMA nativos o adaptados al sitio	Manejo agronómico, uso del suelo o ecorregión	Micorrización	Uso de inoculantes de HMA
Comparador	Testigo sin inocular, inoculante comercial o no adaptado, o fertilización convencional	Otro manejo, otro uso del suelo u otro sitio	Plantas no micorrizadas	Fertilización convencional sin inoculante
Resultados	Biomasa, rendimiento, nutrición, colonización, sanidad y producción de inóculo	Riqueza, composición y diversidad de HMA	Respuestas fisiológicas y moleculares	Costo del inóculo, fertilizante ahorrado, relación beneficio/costo, valor de servicios
Diseños admitidos	Ensayos de campo o invernadero con suelo natural y testigo; *in vitro* solo si describe producción de inóculo nativo	Estudios observacionales con muestreo de campo y caracterización morfológica o molecular	Revisiones de ensayos controlados	Estudios con datos primarios de costos o valoración
Exclusión específica	Sustrato inerte sin aporte a la producción de inóculo; inóculo comercial exótico como único tratamiento; especies forestales o de restauración	Descripciones taxonómicas sin relación con sitio, manejo o uso del suelo	Revisiones sin ensayos controlados	Estimaciones sin datos de campo
Herramienta JBI	Lista para estudios cuasiexperimentales, 9 ítems, versión revisada (Barker et al., 2024)	Lista para estudios transversales analíticos, 8 ítems (Moola et al., 2024)	No se evaluó; se usó como síntesis de apoyo	No aplica (sin estudios incluidos)
Estudios incluidos	14	10	1	0

Nota. Los estudios *in vitro* o monoxénicos no se usaron como prueba de desempeño en campo.

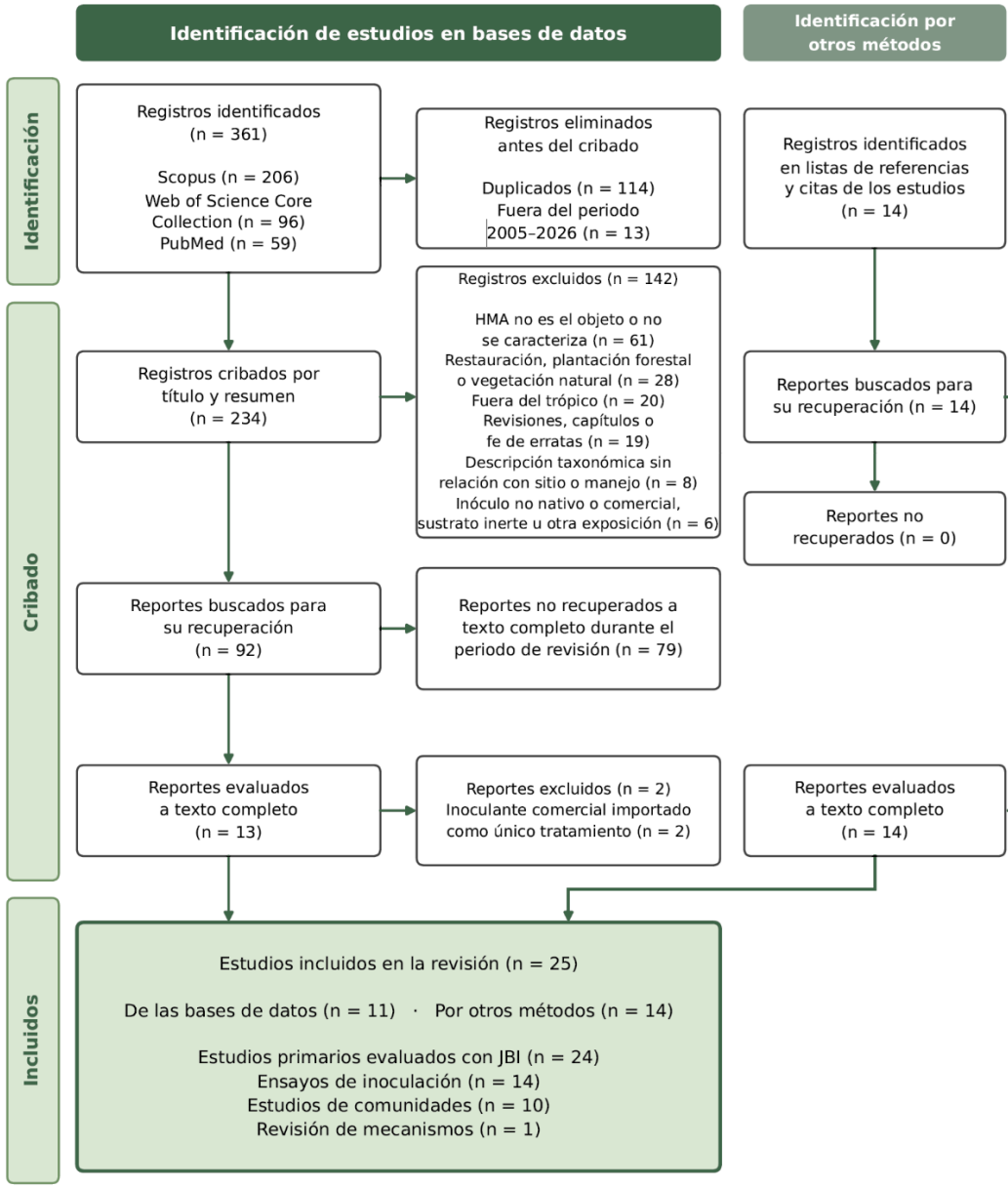


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 de la identificación, el cribado y la inclusión de estudios (búsqueda del 25 de octubre de 2026). Nota. Adaptado de la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021).

Los 234 registros restantes se cribaron por título y resumen en dos pasadas: la primera excluyó 101 registros y la segunda, con el resumen completo y los criterios de la Tabla 1 aplicados de forma estricta, otros 41.

Los motivos fueron que los HMA no eran el objeto de estudio o no se caracterizaban (n = 61), restauración, plantación forestal o vegetación natural sin agroecosistema (n = 28), estudios fuera del trópico (n = 20), revisiones, capítulos o fe de erratas (n = 19), descripciones taxonómicas sin relación con el sitio o el manejo (n = 8) e inóculo no nativo o comercial, sustrato inerte u otra exposición (n = 6); la decisión y el motivo para cada registro se presentan en la Tabla S2. De los 92 reportes potencialmente elegibles se evaluaron 13 a texto completo y 79 no se recuperaron durante el periodo de revisión, por lo que no entraron en la síntesis. Se excluyeron dos ensayos de campo hechos en Ecuador porque aplicaron un inoculante comercial importado como único tratamiento (Capa-Morocho et al., 2024; Loján et al., 2017); se citan como contexto. La revisión de listas de referencias y citas aportó otros 14 estudios. Quedaron 25 estudios: 24 primarios, evaluados con JBI, y una revisión que usamos solo para describir mecanismos (Boyno et al., 2025). De los

primarios, 14 son ensayos de inoculación (cuatro en campo, ocho en invernadero o mesocosmos y dos *in vitro*) y diez son estudios observacionales de comunidades de HMA; ocho de estos últimos se hicieron en Ecuador. El cribado preliminar se hizo con asistencia de un modelo de lenguaje (véase la declaración correspondiente); dos autores revisaron por separado cada decisión de cribado y cada lectura a texto completo, y un tercer autor resolvió por consenso los desacuerdos. Tres estudios incluidos tienen como coautor a un autor de esta revisión (Naranjo-Morán et al., 2025; Naranjo-Moran et al., 2026; Pacheco Flores de Valgaz et al., 2022); su extracción y su evaluación con JBI las hicieron autores que no participaron en ellos.

2.6. Extracción y síntesis. De cada estudio extrajimos país, región o ecorregión, diseño, nivel de evidencia (campo, invernadero, laboratorio u observacional), sistema u hospedador, origen del inóculo, variables de respuesta y efecto principal (Tabla S3). Los efectos se registraron de forma cualitativa y los valores numéricos se atribuyen a cada fuente original. Para responder a la P2, cada beneficio se clasificó como medido (cuantificado en un ensayo con testigo), inferido (deducido de un resultado agronómico sin medición económica) o no cuantificado (servicio descrito sin medición). La ubicación de los estudios ecuatorianos se tomó de las coordenadas o localidades publicadas (Figura 3). No hicimos metaanálisis ni pruebas inferenciales porque los estudios usaban diseños y variables de respuesta demasiado distintos para calcular un tamaño de efecto común. Las tendencias de publicación y los patrones geográficos se describen de forma cualitativa. Las referencias que no forman parte de los 25 estudios incluidos se citan como contexto. Durante la revisión editorial del manuscrito (octubre de 2026) se consultaron fuentes adicionales sobre comparaciones directas entre inoculantes nativos y comerciales, indicadores económicos y normativa ecuatoriana; se citan como contexto y no modifican el conjunto incluido.

2.7. Evaluación de la calidad metodológica. Usamos dos listas de verificación del JBI según el diseño de cada estudio (Tabla 1). Para los ensayos de inoculación en campo, invernadero o laboratorio aplicamos la versión revisada de la herramienta para estudios cuasiexperimentales, de nueve ítems (Barker et al., 2024). La preferimos a la de ensayos aleatorizados porque esta pregunta por el cegamiento de participantes y de quienes aplican el tratamiento, algo que no se puede aplicar en un ensayo agronómico. Los estudios que relacionan la composición o diversidad de HMA con el sitio, el manejo o el uso del suelo se evaluaron con la herramienta para estudios transversales analíticos, de ocho ítems (Moola et al., 2024). En ambas, las preguntas sobre participantes se aplicaron a plantas, parcelas o muestras de suelo.

Cada ítem recibió una de cuatro respuestas: sí (S), no (N), poco claro (PC) o no aplica (NA). El puntaje de cada estudio es el porcentaje de respuestas S sobre los ítems aplicables. Antes de evaluar fijamos tres categorías: calidad alta (≥ 70 %), moderada (50 – 69 %) y baja (< 50 %). Dos revisores aplicaron las listas por separado y resolvieron las diferencias por consenso. Ningún estudio se excluyó por su puntaje; la calificación sirvió para ponderar cuánto confiar en cada inferencia. La revisión de Boyno et al. (2025) se usó solo como síntesis de mecanismos y no se evaluó.

2.8. Aspectos éticos. La revisión trabajó solo con literatura publicada, sin participantes humanos ni animales, por lo que no necesitó aprobación de un comité de ética. Todas las fuentes usadas se citan en el texto.

3. Resultados y discusión

3.1. Características de los estudios incluidos. La Tabla 2 describe los ensayos de inoculación y los estudios de comunidades realizados fuera de Ecuador, junto con los ensayos de inoculación ecuatorianos; los estudios ecuatorianos se detallan en la Tabla 7. De los cuatro ensayos de campo, dos se hicieron en el trópico (Benín y Brasil) y dos en Italia; los ocho de invernadero o mesocosmos usaron suelos o inóculos de Perú, Costa Rica, Ecuador, China y Australia. Al menos seis estudios primarios se hicieron fuera de los trópicos (Italia, España, China, Australia y Marruecos). La Tabla 3 cruza el nivel de evidencia con el tipo de resultado: los resultados agronómicos proceden de cuatro ensayos de campo y seis de invernadero, los ecológicos sobre todo de los diez estudios observacionales, y ninguno de los 24 estudios primarios midió resultados económicos.

3.2. Panorama de la evidencia recuperada. Las publicaciones sobre HMA aumentan desde 2015, al mismo ritmo que mejoró la secuenciación de alto rendimiento y que se consolidaron bases como GlobalAMFungi (Větrovský et al., 2023). Estas herramientas superaron los límites de la taxonomía morfológica y revelaron diversidad en suelos tropicales que se creían homogéneos. Solo cuatro de los 25 estudios incluidos son ensayos de inoculación en campo, y dos de ellos se hicieron en el trópico.

Tabla 2
Ensayos de inoculación y estudios de comunidades incluidos, con país, diseño y origen del inóculo

Estudio	País (región)	Diseño y nivel	Sistema u hospedador	Origen del inóculo	Efecto principal reportado
Akpodé et al. (2024)	Benín	Ensayo, campo	Maíz, suelo ferruginoso	Nativo	HMA nativos con fertilización mineral reducida mejoran nutrición y rendimiento
Cely et al. (2016)	Brasil	Ensayo, campo	Soja y algodón	Adaptado, según los autores	Inoculante de *Rhizophagus clarus* aumenta el rendimiento
Arcidiacono et al. (2025)	Italia	Ensayo, campo	Girasol	Consorcio local	Consorcio local promueve rasgos agronómicos sin alterar la comunidad de HMA en raíces
Marrassini et al. (2026)	Italia	Ensayo, campo	Rotación maíz–trigo	No nativo del sitio (aislados de los Países Bajos)	El inóculo aumentó el rendimiento del maíz sin sinergia con compost o biochar; efecto residual sobre el trigo del año siguiente; diferenciación funcional entre especies
Corazon-Guivin et al. (2024)	Perú (Amazonía)	Ensayo, invernadero	*Plukenetia volubilis*	Nativo	Especies nativas aumentan biomasa y nutrientes foliares y reducen la infección por *Meloidogyne incognita*
Xia et al. (2023)	China (Guizhou)	Ensayo, invernadero	*Acorus calamus*, cromo	No nativo (*R. intraradices* adquirido en la Universidad de Changjiang); suelo esterilizado	HMA mejoran la resistencia al cromo y modifican la comunidad rizosférica
Frew et al. (2024)	Australia (suelo de Queensland)	Ensayo, invernadero	*Sorghum bicolor*, herbivoría foliar	Comunidad del suelo de campo	La herbivoría reestructura el ensamblaje de HMA con beneficio de P
Yue et al. (2026)	China (Henan)	Ensayo, mesocosmos en macetas al aire libre	Maní (*Arachis hypogaea*), microplásticos de PVC	No nativo (*R. intraradices* BGC JX04B, Universidad de Changjiang); suelo esterilizado	Los HMA mitigan cambios inducidos por microplásticos en la red del suelo
Naranjo-Morán et al. (2025)	Ecuador (costa)	Ensayo, invernadero	Plantas trampa y sustrato	Nativo	La elección de planta trampa y sustrato determina la producción de inóculo
Iglesias et al. (2011)	Costa Rica	Ensayo, invernadero	Cacao e *Inga edulis*	Nativo (raíces de plantación orgánica)	El cacao respondió solo al inóculo de raíces de cacao; la inga respondió a todos los inóculos
Symanczik et al. (2017)	Ecuador (Amazonía, Napo); ensayo en Suiza	Ensayo, invernadero	Naranjilla (*Solanum quitoense*)	Suelos de plantaciones convencional, orgánica y de permacultura; cepas europeas de referencia	Sin diferencias en biomasa; el suelo de permacultura y *R. irregulare* aumentaron el P de la planta
Viera et al. (2017)	Ecuador (Andes)	Ensayo, invernadero	Portainjertos de tomate de árbol (*Solanum* spp.)	Nativo, multiplicado de suelos de Mindo, Nanegalito, Mitad del Mundo y Patate; comparado con *Glomus* sp. comercial	Los inóculos de Mindo y Mitad del Mundo superaron al comercial en P foliar y colonización
Gagou et al. (2026)	Marruecos	Ensayo, laboratorio (*in vitro*)	*Rhizophagus irregularis* nativo	Nativo	Cultivo monoxénico produce inóculo viable de aislado nativo
Naranjo-Moran et al. (2026)	Ecuador (costa)	Ensayo, laboratorio (*in vitro*)	Cultivo autotrófico con *Bidens pilosa*, *Tagetes patula* y *Tridax procumbens*	Nativo (asteráceas ruderales de Guayaquil)	Las tres asteráceas se micorrizaron *in vitro* (55–66 %) y produjeron inóculo nativo
Carballar-Hernández et al. (2017)	México	Observacional, campo	*Capsicum annuum*	No aplica	Comunidades nativas responden a las propiedades del suelo y al manejo
Alguacil et al. (2014)	España	Observacional, campo	Suelo mediterráneo	No aplica	El manejo modifica composición y diversidad de HMA, ligadas a la actividad biológica
Boyno et al. (2025)	Varios	Revisión	Estrés salino (celular y molecular)	No aplica	Regulación osmótica, enzimas antioxidantes (SOD, CAT, APX) y acuaporinas

Nota. Los efectos se reportan de forma cualitativa; los valores cuantitativos deben consultarse en cada fuente. Los ocho estudios observacionales hechos en Ecuador se describen en la Tabla 7. La revisión de **Boyno et al. (2025)** se incluye como síntesis de mecanismos y no se evaluó con JBI.

Tabla 3
Nivel de evidencia y tipo de resultado de los 25 estudios incluidos

Nivel de evidencia	Agronómico (biomasa, rendimiento, nutrición, sanidad)	Ecológico (comunidad de HMA o del suelo)	Producción de inóculo	Económico
Ensayo de campo (n = 4)	4: Akpodé et al. (2024); Cely et al. (2016); Arcidiacono et al. (2025); Marrassini et al. (2026)	1: Arcidiacono et al. (2025)	0	0
Ensayo de invernadero o mesocosmos (n = 8)	6: Corazon-Guivin et al. (2024); Xia et al. (2023); Frew et al. (2024); Iglesias et al. (2011); Symanczik et al. (2017); Viera et al. (2017)	4: Xia et al. (2023); Frew et al. (2024); Yue et al. (2026); Symanczik et al. (2017)	1: Naranjo-Morán et al. (2025)	0
Ensayo de laboratorio (n = 2)	0	0	2: Gagou et al. (2026); Naranjo-Moran et al. (2026)	0
Observacional de campo (n = 10)	0	10: Tablas 2 y 7	0	0
Revisión de mecanismos (n = 1)	Mecanismos fisiológicos bajo salinidad: Boyno et al. (2025)	0	0	0

Nota. Un estudio puede aportar más de un tipo de resultado, por lo que las filas no suman el número de estudios.

Entre los 25 incluidos predominan los estudios de comunidades (n = 10) y los ensayos de invernadero (n = 8) sobre los ensayos de campo (n = 4), de modo que las conclusiones más firmes de esta literatura son ecológicas (cómo es la comunidad y cómo responde al manejo), mientras que las agronómicas y económicas, que requieren ensayos de campo con réplicas y testigos, están poco representadas. El desplazamiento de HMA benéficos bajo manejo intensivo está documentado solo en parte en cultivos tropicales, y pocas veces se han medido en campo sus consecuencias funcionales (Yang et al., 2021). Con este material, se puede ordenar la evidencia por nivel y señalar vacíos, pero no estimar magnitudes agregadas.

3.3. Síntesis de la evidencia experimental. Los cuatro ensayos de campo compararon plantas inoculadas con testigos sin inocular, y ninguno incluyó un inoculante comercial como comparador. En Benín, consorcios nativos aplicados con dosis reducidas de fertilizante mineral mejoraron la nutrición y el rendimiento del maíz (Akpodé et al., 2024), y en Brasil un inoculante de *Rhizophagus clarus* aumentó el rendimiento de soja y algodón (Cely et al., 2016). Los otros dos ensayos de campo se hicieron en Italia. Un consorcio local mejoró rasgos agronómicos del girasol (Arcidiacono et al., 2025). En una rotación maíz–trigo de dos años, aislados de *F. mosseae* y *A. trappei* procedentes de los Países Bajos aumentaron el rendimiento del maíz, sin efecto sinérgico con compost o biochar; una sola inoculación antes del maíz mantuvo efectos sobre el rendimiento y los nutrientes del trigo del año siguiente, y las dos especies difirieron en los nutrientes que aumentaron (Marrassini et al., 2026). En la Amazonía peruana, dos especies nativas descritas hace poco, *Nanoglomus plukenetiae* y *Rhizoglomus variabile*, aumentaron la biomasa y el contenido foliar de nutrientes de *Plukenetia volubilis* y redujeron la infección por *Meloidogyne incognita* en invernadero (Corazon-Guivin et al., 2024). En Costa Rica, raíces de cacao de una plantación orgánica usadas como inóculo estimularon el crecimiento de plántulas de cacao, mientras que la inga respondió a todos los inóculos; el cacao mostró preferencia por el inóculo de su propia especie (Iglesias et al., 2011).

Dos ensayos incluidos, ambos en invernadero y en suelos ecuatorianos, compararon inóculos nativos con inóculos comerciales o exóticos. En portainjertos de tomate de árbol, los inóculos multiplicados a partir de suelos de Mindo y Mitad del Mundo superaron a un *Glomus* sp. comercial en fósforo foliar y colonización (Viera et al., 2017). En naranjilla, el suelo de una plantación en permacultura de Napo aumentó el fósforo de la planta tanto como dos cepas europeas de referencia, sin diferencias en biomasa (Symanczik et al., 2017). Los resultados son favorables o equivalentes al inóculo nativo, pero ninguno se obtuvo en campo, de modo que con los estudios incluidos no se puede afirmar que los consorcios nativos superen a los inoculantes comerciales en condiciones de producción. Fuera de este conjunto hay comparaciones de campo. En Côte d'Ivoire, un aislado nativo de *Rhizophagus irregularis* obtenido de la rizosfera de ñame superó a un inoculante comercial exótico en colonización, crecimiento y producción de tubérculos en dos sitios de campo con suelos contrastantes (Kouadio et al., 2017). En ñame de África occidental, 6 de 11 aislados tropicales de *Glomus etunicatum* aumentaron el crecimiento de los tubérculos frente al testigo, mientras que tres aislados europeos tendieron a ser menos efectivos (Tchabi et al., 2010). Un metaanálisis a escala global encontró que los inoculantes

comerciales de origen global rinden menos de lo esperado (Koziol et al., 2025). La búsqueda recuperó además el trabajo de Tchabi et al. (2010) y los resúmenes de comparaciones similares en yuca (Séry et al., 2016) y maní (Quilambo et al., 2005), cuyos textos completos no se recuperaron durante la revisión; se citan como contexto y su peso se discute en la sección 3.13.

El efecto, además, cambia con el contexto y no puede extenderse a cualquier suelo o cultivo (Hoeksema et al., 2010; Marrassini et al., 2026). Un metaanálisis de 187 estudios muestra cuánto pesa el tipo de ensayo: la respuesta de la biomasa y de la nutrición con N y P fue mayor en laboratorio que en campo, y mayor con una sola especie que con mezclas (Wu et al., 2024). El beneficio también varía entre especies y grupos taxonómicos de HMA (Marro et al., 2022), que un inóculo sea nativo no exime de seleccionar los aislados por su función.

La Figura 2 separa la evidencia en tres niveles. Los resultados agronómicos (nivel 3) proceden de ensayos de campo y las respuestas de la planta (nivel 2), de ensayos de invernadero. Los mecanismos fisiológicos (nivel 1: ajuste osmótico, enzimas antioxidantes, acuaporinas, ABA y estrigolactonas) provienen de una revisión de ensayos controlados bajo salinidad (Boyno et al., 2025) y ningún estudio incluido los evaluó en campo. Las flechas entre niveles representan inferencias y no relaciones demostradas en un mismo sistema: que un consorcio nativo aumente el rendimiento del maíz en Benín no prueba que lo haga a través de una mayor actividad de acuaporinas o de enzimas antioxidantes. Tampoco hay evidencia en los estudios revisados de que los inoculantes comerciales reduzcan esos mecanismos; esa diferencia, si existe, debe medirse en ensayos que incluyan ambos tipos de inóculo.



Figura 2. Evidencia sobre HMA nativos ordenada por niveles: mecanismos fisiológicos, respuestas de la planta y resultados agronómicos. El grosor del borde indica el nivel de evidencia de cada estudio incluido; el borde discontinuo señala mecanismos descritos en ensayos controlados que los estudios incluidos no evaluaron en campo. Las flechas indican inferencias entre niveles y no relaciones demostradas en un mismo sistema. Nota. AQP: acuaporinas; SOD: superóxido dismutasa; CAT: catalasa; APX: ascorbato peroxidasa; ABA: ácido abscísico.

3.4. Sistemas agroforestales como reservorios de diversidad de HMA. La agricultura intensiva reduce la riqueza y la diversidad de HMA y puede empujar a la comunidad hacia ensamblajes menos benéficos (Johnson, 1993; Sofi et al., 2017). En sistemas agroforestales, sobre todo si se combinan con labranza reducida y enmiendas orgánicas, la diversidad de HMA y la actividad microbiana se mantienen y a veces aumentan (Lucas et al., 2025). Estos sistemas también sostienen interacciones con rizobios y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) que favorecen el ciclo de nutrientes y la sanidad de las plantas (Dhiman et al., 2022), y ayudan a estabilizar el rendimiento bajo estrés abiótico (Nath et al., 2025). Los HMA, a su vez, influyen en la diversidad y en el ensamblaje de las comunidades vegetales (Tedersoo et al., 2020; Zhang et al., 2024). Lo que ocurre sobre el suelo también cuenta: el daño por insectos cambia la presión de selección sobre la comunidad fúngica y puede reordenar los linajes de HMA que colonizan la raíz (Frew et al., 2024).

La Tabla 4 ordena los estudios incluidos por tipo de agroecosistema y práctica de manejo, y permite separar lo demostrado de lo hipotético. Los estudios incluidos respaldan que el manejo y el uso del suelo modifican la composición y la diversidad de las comunidades de HMA: en cacao de la costa ecuatoriana (Pacheco Flores de Valgaz et al., 2022), en fincas andinas frente a vegetación no cultivada (Stewart et al., 2026), en parcelas andinas de maíz y papa frente a un pastizal naturalizado (Avila-Salem et al., 2020), entre tomate de árbol cultivado y su pariente silvestre (Vivanco Galván et al., 2020), en chile en México (Carballar-Hernández et al., 2017) y en suelo mediterráneo (Alguacil et al., 2014). Solo un estudio midió si las comunidades de los sistemas menos intensivos rinden más como inóculo: en cultivos trampa, el suelo de una plantación de naranjilla en permacultura produjo más colonización (44 %) que los de plantaciones orgánica (21 %) y convencional (9 %), y como inóculo aumentó el fósforo de la planta (Symanczik et al., 2017). Ninguno comparó un sistema agroforestal tropical con un monocultivo. Que los sistemas agroforestales tropicales funcionen como reservorios funcionales de HMA sigue siendo una hipótesis: la apoyan la literatura de contexto (Lucas et al., 2025) y el resultado en naranjilla, pero ese ensayo usó cultivos trampa en invernadero y no muestreó la comunidad en campo. Para comprobarla haría falta muestrear sistemas agroforestales y monocultivos pareados y probar el inóculo obtenido de cada uno en un mismo ensayo.

3.5. Caracterización molecular y bioprospección participativa. Los métodos moleculares cambiaron la forma de estudiar la biodiversidad del suelo. Con marcadores multigénicos y secuenciación de alto rendimiento es posible separar especies de HMA y describir su diversidad intraespecífica en campo (Alguacil et al., 2014).

Tabla 4
Estudios incluidos según tipo de agroecosistema y práctica de manejo

Sistema (país)	Manejo o factor comparado	Estudio	Variable sobre HMA	¿Midió función?
Cacao (Ecuador, costa)	Práctica conservadora frente a semiconservadora	Pacheco Flores de Valgaz et al. (2022)	Diversidad (morfología e ITS)	No
Maíz y papa (Ecuador, Andes)	Finca frente a vegetación no cultivada adyacente	Stewart et al. (2026)	Diversidad a lo largo de un gradiente climático	No
Capsicum annuum (México)	Propiedades del suelo y manejo agronómico	Carballar-Hernández et al. (2017)	Composición de la comunidad nativa	No
Suelo agrícola (España)	Prácticas de manejo	Alguacil et al. (2014)	Composición y diversidad	Parcial: actividad biológica del suelo
Maíz (Benín)	Consorcio nativo con fertilización mineral reducida	Akpodé et al. (2024)	Inoculación	Sí: nutrición y rendimiento
Girasol (Italia)	Inoculación con consorcio local	Arcidiacono et al. (2025)	Comunidad en raíz	Sí: rasgos agronómicos
Maíz–trigo (Italia)	HMA con enmiendas orgánicas	Marrassini et al. (2026)	Especies de HMA	Sí: respuesta del cultivo
Naranjilla (Ecuador, Amazonía)	Manejo convencional, orgánico y de permacultura	Symanczik et al. (2017)	Colonización en cultivos trampa y comunidad	Sí: P de la planta inoculada
Maíz, papa y pastizal (Ecuador, Andes)	Cultivo anual frente a pastizal naturalizado	Avila-Salem et al. (2020)	Esporas, hifas, colonización y glomalina	Parcial: actividad enzimática del suelo
Tomate de árbol (Ecuador, sur)	Especie cultivada frente a pariente silvestre	Vivanco Galván et al. (2020)	Colonización y OTU (SSU)	No
Sistemas agroforestales tropicales	Agroforestería frente a monocultivo	Ningún estudio incluido	—	—

Varios estudios de campo muestran que el manejo agronómico y la intensidad de uso del suelo modifican la composición de las comunidades nativas (Carballar-Hernández et al., 2017; Ciccolini et al., 2016; Lumini et al., 2011); ese tipo de diagnóstico gana utilidad cuando se contrasta con lo que los agricultores saben de sus parcelas. Los HMA reclutan bacterias funcionales que aceleran el recambio de nutrientes en la rizosfera (Xu et al., 2023) y forman consorcios con rizobios, PGPR y otros microorganismos que mejoran la sanidad vegetal (Giovannini et al., 2020). Un consorcio de varios propósitos podría, por tanto, reemplazar parte de los insumos convencionales.

Cada método resuelve una pregunta distinta (Tabla 5). Los estudios ecuatorianos incluidos usaron seis aproximaciones: morfología de esporas e ITS en cacao (Pacheco Flores de Valgaz et al., 2022), ITS en la rizosfera de *Inga* (Arévalo-Granda et al., 2023), LSU en suelo contaminado con petróleo (Garcés-Ruiz et al., 2019), la región SSU con clonación y secuenciación Sanger en el bosque seco de Laipuna y en tomate de árbol (Haug et al., 2021; Vivanco Galván et al., 2020), la región SSU con los cebadores WANDA y AML2 y secuenciación Illumina en el transecto andino (Stewart et al., 2026) y lecturas largas de unos 1300 pb en cultivos trampa con suelos de naranjilla (Symanczik et al., 2017). Michel et al. (2025) solo cuantificaron la colonización mediante tinción de raíces, y Avila-Salem et al. (2020), Viera et al. (2017) y Naranjo-Morán et al. (2025, 2026) se basaron en el recuento o la morfología de esporas. Como cada marcador define unidades taxonómicas distintas, los inventarios no son comparables entre sí sin reanálisis, lo que justifica adoptar un marcador común en las campañas futuras.

Como aporte de esta revisión, la Tabla 6 propone una secuencia verificable en cuatro etapas (identificación, selección funcional, producción de inóculo y validación agronómica) en la que cada etapa tiene un criterio que permite comprobar si se cumplió antes de pasar a la siguiente. La secuencia incorpora criterios de trazabilidad (código de origen y de lote), bioseguridad (uso del aislado dentro de su ecorregión de origen), calidad del inóculo (criterios mínimos de Salomon et al., 2022) y conservación de la diversidad durante la propagación. Este último punto tiene respaldo empírico: con suelos agrícolas de Kenia, los cultivos trampa recuperaron 32 especies de HMA, pero 12 especies presentes en el suelo de campo no se propagaron (Sakha et al., 2025).

3.6. Evidencia disponible para Ecuador. Doce de los estudios incluidos se hicieron en Ecuador: ocho observacionales y cuatro de inoculación o producción de inóculo (Tabla 7; Figura 3). La búsqueda identificó otros 26 reportes sobre HMA en Ecuador que no se recuperaron a texto completo (sección 3.13).

Tabla 5
Ventajas y limitaciones de los métodos de identificación de HMA citados en la revisión

Método	Qué permite resolver	Ventajas	Limitaciones	Uso en estudios ecuatorianos incluidos
Morfología de esporas	Especies que esporulan en el muestreo	Bajo costo; permite aislar y multiplicar el hongo	No detecta taxones sin esporas en ese momento; exige taxónomo especializado	Pacheco Flores de Valgaz et al. (2022); Naranjo-Morán et al. (2025); Avila-Salem et al. (2020); Naranjo-Moran et al. (2026)
Región SSU del ARNr (p. ej., WANDA/AML2)	Taxones virtuales o variantes de secuencia	Bases de referencia amplias (MaarjAM, GlobalAMFungi); comparable entre estudios	Resolución limitada al nivel de especie	Haug et al. (2021); Vivanco Galván et al. (2020); Stewart et al. (2026)
ITS	Micobioma completo, incluidos HMA	Describe a la vez HMA y otros hongos	Alta variación intraespecífica en HMA; cebadores generales subrepresentan Glomeromycota	Pacheco Flores de Valgaz et al. (2022); Arévalo-Granda et al. (2023)
Región LSU del ARNr	Especies y linajes cercanos	Mejor resolución entre especies próximas	Menos secuencias de referencia que SSU	Garcés-Ruiz et al. (2019)
Marcadores multigénicos o lecturas largas	Especie y variación intraespecífica; seguimiento de un aislado	Delimitación más fina; útil para rastrear un inóculo en campo	Mayor costo y análisis bioinformático más exigente	Symanczik et al. (2017), en cultivos trampa

Nota. Ventajas y limitaciones según la evaluación de los autores sobre los métodos empleados en los estudios incluidos y en GlobalAMFungi (Větrovský et al., 2023).

Tabla 6
Secuencia verificable propuesta para pasar de la identificación de HMA nativos a su validación agronómica

Etapa	Actividad	Criterio verificable para pasar a la etapa siguiente	Trazabilidad, bioseguridad, calidad y conservación
1. Identificación	Muestreo pareado de agroecosistema y vegetación nativa; metabarcoding SSU; aislamiento de esporas en plantas trampa	Secuencias depositadas en una base pública con coordenadas y metadatos de suelo	Código de origen (sitio, fecha, hospedador); autorización o contrato de acceso cuando corresponda
2. Selección funcional	Ensayo en suelo no estéril con testigo sin inocular e inoculante comercial; dos o más hospedadores locales	Efecto significativo frente a ambos comparadores y colonización medida	Los aislados no se liberan fuera de su ecorregión de origen durante la selección
3. Producción de inóculo	Multiplicación en plantas trampa con varios hospedadores o cultivo monoxénico (Gagou et al., 2026; Naranjo-Morán et al., 2025; Naranjo-Moran et al., 2026)	Lote con propágulos infectivos, viabilidad y ausencia de patógenos según criterios mínimos (Salomon et al., 2022)	Código de lote; registro de hospedadores; comparación periódica de la composición del inóculo con la del suelo de origen (Sakha et al., 2025)
4. Validación agronómica	Ensayos en bloques en fincas, en dos o más campañas y sitios, con rastreo molecular del inóculo	Diferencia en rendimiento y fertilizante ahorrado frente al testigo y al inoculante comercial	Registro del lote aplicado; seguimiento del efecto sobre la comunidad residente (Arcidiacono et al., 2025)

Nota. Propuesta de los autores. Los umbrales concretos (por ejemplo, propágulos infectivos por gramo) deben fijarse con la autoridad de registro.

Tabla 7
Estudios sobre HMA en Ecuador incluidos en la revisión

Estudio	Región y localidad	Ecosistema o sistema	Método de identificación	Hallazgo principal
Haug et al. (2021)	Sur; Loja (Laipuna)	Bosque seco premontano	SSU parcial (NS1/NS4 y AML1/AML2), clonación y secuenciación Sanger	Dominancia de "Global AM fungi"; *Glomus* distribuido
Garcés-Ruiz et al. (2019)	Amazonía	Plantas nativas en suelo con petróleo	LSU, pirosecuenciación 454	Composición de HMA en suelo contaminado
Arévalo-Granda et al. (2023)	Amazonía; Orellana (Estación Tiputini)	Rizosfera de *Inga* sp. en bosque no intervenido	ITS, metabarcoding	Micobioma y HMA en bosque no perturbado
Michel et al. (2025)	Amazonía; Morona Santiago (cordillera del Cutucú)	Helechos de bosque montano bajo	Tinción de raíces (KOH y azul de anilina) y microscopía; sin identificación de taxones	Micorrización baja y facultativa: 30,5% de 82 especies de helechos con HMA
Pacheco Flores de Valgaz et al. (2022)	Costa; Los Ríos, Manabí y Guayas	*Theobroma cacao*	Morfología e ITS (Illumina)	La diversidad de HMA difiere entre prácticas de cultivo
Stewart et al. (2026)	Sierra; transecto andino de unos 500 km	28 fincas de maíz o papa con vegetación no cultivada pareada	SSU (WANDA/AML2), Illumina	El uso del suelo remodela la diversidad ligada al clima
Naranjo-Morán et al. (2025)	Costa; Guayas	Plantas trampa y sustrato	Morfología de esporas a nivel de género; colonización con azul de tripano	La elección de planta trampa y sustrato determina la producción de inóculo
Symanczik et al. (2017)	Amazonía; Napo (Archidona)	Plantaciones de naranjilla con tres tipos de manejo	Lecturas largas (PacBio, unos 1300 pb) en cultivos trampa	Más colonización con suelo de permacultura (44%) que orgánico (21%) o convencional (9%)
Avila-Salem et al. (2020)	Sierra; Pichincha (Tumbaco)	Maíz, papa y pastizal naturalizado	Morfología de esporas; hifas, glomalina y enzimas	Más colonización y esporas en el pastizal que en los cultivos
Vivanco Galván et al. (2020)	Sur; Loja	Tomate de árbol cultivado y *Solanum cajanumensis* silvestre	SSU, clonación y secuenciación Sanger	Más colonización (88,2% frente a 68,8%) y más OTU en la especie silvestre
Viera et al. (2017)	Sierra; Pichincha y Tungurahua	Portainjertos de tomate de árbol en invernadero	Morfología de esporas; colonización	Inóculos nativos superaron a un *Glomus* sp. comercial en P foliar y colonización
Naranjo-Moran et al. (2026)	Costa; Guayas (campus de Guayaquil)	Cultivo autotrófico *in vitro* con asteráceas trampa	Morfología de esporas; colonización con tinción	Micorrización *in vitro* de 55% – 66% en tres asteráceas ruderales

Nota. Los ensayos de campo con inoculantes comerciales importados de Loján et al. (2017), Capa-Morocho et al. (2024) y Sisalima-Ortega et al. (2023) no se incluyeron en la síntesis y se muestran en la Figura 3 como referencia.

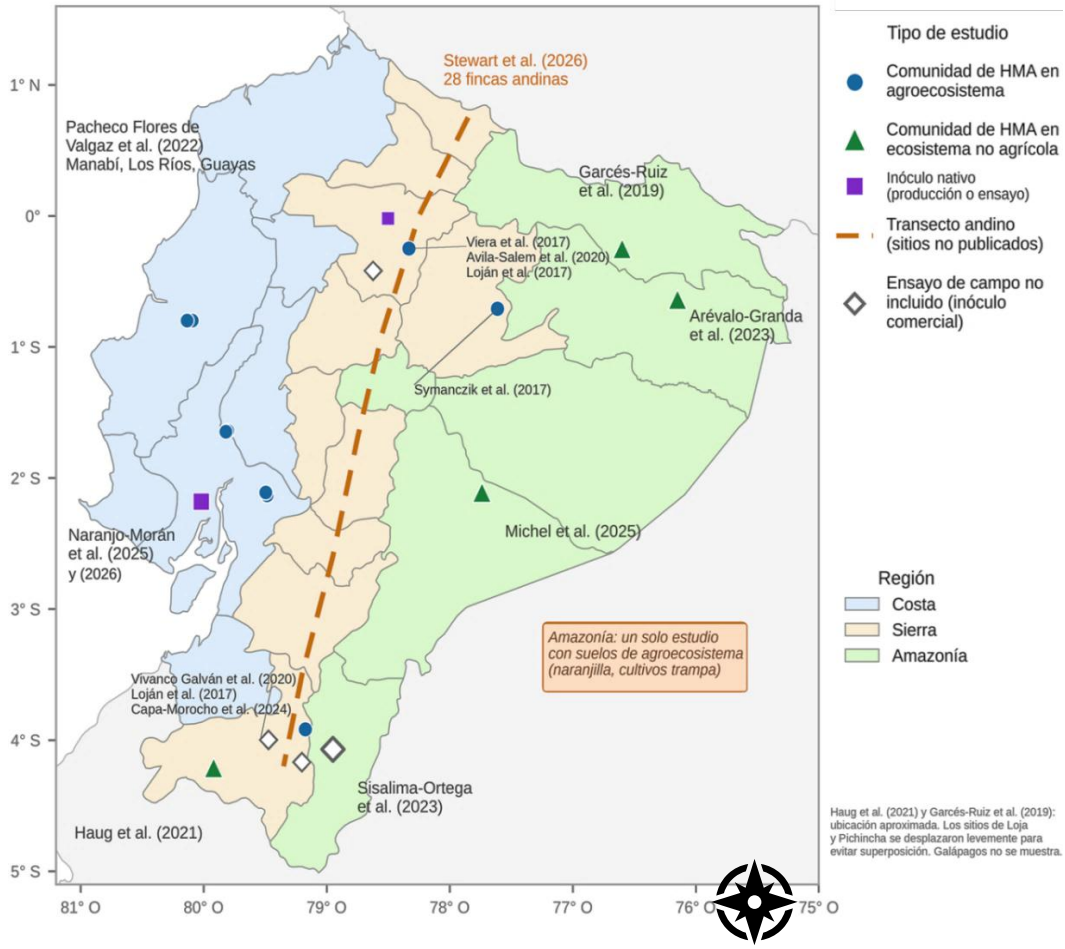


Figura 3. Distribución de los estudios sobre HMA en Ecuador incluidos en la revisión y vacíos de caracterización.

En la costa, la diversidad de HMA en cacao difirió entre prácticas de cultivo conservadora y semiconservadora en fincas de Los Ríos, Manabí y Guayas (Pacheco Flores de Valgaz et al., 2022); en Guayaquil se compararon plantas trampa y sustratos locales para multiplicar inóculo (Naranjo-Morán et al., 2025) y se estableció un cultivo autotrófico *in vitro* de HMA nativos con asteráceas trampa (Naranjo-Moran et al., 2026).

En los Andes, un transecto de unos 500 km con 28 fincas de maíz o papa, cada una pareada con vegetación no cultivada, mostró que el cambio de uso del suelo modifica los patrones de diversidad de HMA asociados al clima (Stewart et al., 2026). En Pichincha, las parcelas de maíz y papa difirieron de un pastizal naturalizado en longitud de hifas, proteína relacionada con la glomalina y actividad enzimática, y el pastizal tuvo más colonización y más esporas (Avila-Salem et al., 2020). En tomate de árbol, el pariente silvestre *Solanum cajanumensis* tuvo más colonización que la especie cultivada (88,2 % frente a 68,8 %) y más OTU (Vivanco Galván et al., 2020), y los inóculos multiplicados a partir de suelos de Mindo y Mitad del Mundo (Pichincha) superaron a un *Glomus* sp. comercial en portainjertos (Viera et al., 2017). En el bosque seco premontano de Laipuna, en el sur, dominan taxones de amplia distribución del grupo "Global AM fungi", con fuerte presencia de *Glomus* (Haug et al., 2021). En la Amazonía, tres estudios se hicieron fuera de agroecosistemas: en plantas nativas sobre suelo contaminado con petróleo (Garcés-Ruiz et al., 2019), en la rizosfera de *Inga* en bosque no intervenido de la Estación de Biodiversidad Tiputini (Arévalo-Granda et al., 2023) y en helechos de bosque montano bajo en las estribaciones de la cordillera del Cutucú, donde la micorrización fue baja y facultativa (Michel et al., 2025). El único estudio con suelos de agroecosistemas amazónicos usó plantaciones de naranjilla de Napo: en cultivos trampa, el suelo de permacultura produjo más colonización que los de manejo orgánico y convencional, y como inóculo aumentó el fósforo de la planta tanto como dos cepas europeas de referencia (Symanczik et al., 2017).

Los tres ensayos de campo con HMA identificados en Ecuador usaron inoculantes comerciales importados y no se incluyeron en la síntesis (Tabla 1). En papa, cuatro productos con *Rhizophagus irregularis* DAOM 197198 no aumentaron el rendimiento en Loja ni en Quito, el inóculo apenas se estableció y las raíces estuvieron dominadas por una *Acaulospora* nativa no descrita (Loján et al., 2017). En maíz blanco de Loja, un producto comercial con HMA aumentó el número de mazorcas, el peso del grano y el rendimiento, que llegó a 9,9 t ha^{-1} en combinación con nitrógeno (Capa-Morocho et al., 2024). En cacao Nacional de siete años en Zamora Chinchipe, aplicaciones mensuales de un inoculante importado dieron mazorcas más pesadas, más almendras por fruto y mayor rendimiento, sin cambios en la incidencia de moniliasis; el producto trae un soporte orgánico cuyo efecto no se separó (Sisalima-Ortega et al., 2023). Estos ensayos muestran que la respuesta a la micorrización puede medirse en campo en Ecuador, pero ninguno probó consorcios locales.

Se propone priorizar la Amazonía en la caracterización por tres criterios que se desprenden de la Tabla 7. Primero, es la región con menos evidencia en agroecosistemas: un solo estudio, que analizó los suelos de tres plantaciones de naranjilla en cultivos trampa y no la comunidad de las raíces en campo (Symanczik et al., 2017), frente a los datos de cacao en la costa y de maíz, papa, pastizal y tomate de árbol en los Andes. Segundo, el único ensayo de inoculación en campo de la región usó un producto importado (Sisalima-Ortega et al., 2023), de modo que no existe una línea de base sobre el desempeño de consorcios locales en campo. Tercero, el cacao Nacional amazónico ya mostró una respuesta medible a la micorrización y el suelo de permacultura de Napo mostró potencial como inóculo, lo que permite diseñar ensayos con cultivos de valor comercial. Priorizar la Amazonía no significa que las otras regiones estén bien caracterizadas: la costa tiene un solo estudio de comunidades y el sur, uno en bosque seco y otro en tomate de árbol. La Tabla 8 propone indicadores medibles para las campañas futuras.

Las ubicaciones proceden de las coordenadas o localidades publicadas; las de Haug et al. (2021) y Garcés-Ruiz et al. (2019) son aproximadas, y los sitios de Loja y Pichincha se desplazaron levemente para evitar superposición. Los rombos señalan ensayos de campo con inoculantes comerciales importados, citados como contexto (Capa-Morocho et al., 2024; Loján et al., 2017; Sisalima-Ortega et al., 2023). El transecto andino de Stewart et al. (2026) se representa como línea porque los sitios individuales no se publicaron. Límites provinciales: Natural Earth (dominio público).

3.7. Calidad metodológica de los estudios incluidos.

La Tabla 9 recoge la evaluación con JBI. De los 24 estudios primarios, 19 obtuvieron calidad alta y cinco moderada (Avila-Salem et al., 2020; Gagou et al., 2026; Garcés-Ruiz et al., 2019; Naranjo-Moran et al., 2026; Vivanco Galván et al., 2020); ninguno cayó en la categoría baja. Los problemas se repitieron en pocos ítems. En 13 de los 14 ensayos de inoculación no hubo una medición antes de inocular que sirviera de línea de base (ítem P5), y en seis no queda claro si se perdieron unidades experimentales. En nueve de los diez estudios de comunidades no se explica cómo se controlaron variables de confusión como el pH, el fósforo disponible o el hospedador, que cambian junto con el sitio y el manejo; en dos de ellos, además, cada uso del suelo se representó con una sola parcela (Avila-Salem et al., 2020) o cada hospedador con un solo sitio (Vivanco Galván et al., 2020). Estas 2 carencias reducen la confianza de maneras distin-tas. Sin una medición previa, un ensayo no puede separar el efecto de la inoculación de diferencias iniciales entre parcelas; los 4 ensayos de campo tienen esta limitación, y solo uno siguió el efecto en un segundo cultivo (Marrassini et al., 2026).

Tabla 8
Indicadores propuestos para futuras campañas de caracterización de HMA en Ecuador

Indicador	Forma de medición	Para qué sirve
Cobertura territorial	Número de agroecosistemas muestreados por provincia y ecorregión	Detectar vacíos; en los estudios incluidos, la Amazonía solo tiene suelos de naranjilla analizados en cultivos trampa
Muestreo pareado	Proporción de sitios con vegetación nativa de referencia adyacente	Separar el efecto del uso del suelo, como en Stewart et al. (2026)
Comparabilidad molecular	Proporción de muestras secuenciadas con un marcador SSU común y depositadas en una base pública	Comparar con GlobalAMFungi y entre regiones
Metadatos mínimos	Proporción de muestras con pH, fósforo disponible, materia orgánica, textura, hospedador y manejo	Controlar variables de confusión (Tabla 9)
Repetición temporal	Número de sitios muestreados en dos o más épocas	Estimar la estabilidad de la comunidad
Conversión en recurso	Número de aislados establecidos en colección viva con secuencia de referencia	Pasar del inventario a la selección funcional

Tabla 9
Matriz de evaluación de la calidad metodológica de los estudios primarios incluidos según las listas de verificación del JBI

Estudio	Herr.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	%	Calidad
Ensayos de inoculación (herramienta para estudios cuasiexperimentales, CE)												
Akpodé et al. (2024)	CE	S	S	S	S	N	S	S	PC	S	78	Alta
Cely et al. (2016)	CE	S	S	S	S	N	S	S	PC	S	78	Alta
Arcidiacono et al. (2025)	CE	S	S	S	S	N	S	S	S	S	89	Alta
Marrassini et al. (2026)	CE	S	S	S	S	N	S	S	S	S	89	Alta
Xia et al. (2023)	CE	S	S	S	S	N	S	S	S	S	89	Alta
Frew et al. (2024)	CE	S	S	S	S	N	S	S	S	S	89	Alta
Yue et al. (2026)	CE	S	S	S	S	N	S	S	S	S	89	Alta
Corazon-Guivin et al. (2024)	CE	S	S	S	S	N	S	S	S	S	89	Alta
Naranjo-Morán et al. (2025)	CE	S	PC	S	S	N	S	S	S	S	78	Alta
Gagou et al. (2026)	CE	S	PC	S	S	S	S	S	PC	PC	67	Moderada
Symanczik et al. (2017)	CE	S	S	S	S	N	S	S	S	S	89	Alta
Iglesias et al. (2011)	CE	S	S	S	S	N	S	S	PC	S	78	Alta
Viera et al. (2017)	CE	S	S	S	S	N	S	S	PC	S	78	Alta
Naranjo-Moran et al. (2026)	CE	S	S	S	S	N	S	PC	PC	S	67	Moderada
Estudios de comunidades de HMA (herramienta para estudios transversales analíticos, TA)												
Carballar-Hernández et al. (2017)	TA	S	S	S	S	S	PC	S	S	—	88	Alta
Alguacil et al. (2014)	TA	S	S	S	S	PC	PC	S	S	—	75	Alta
Haug et al. (2021)	TA	S	S	S	S	N	N	S	S	—	75	Alta
Garcés-Ruiz et al. (2019)	TA	S	S	PC	S	N	N	S	PC	—	50	Moderada
Arévalo-Granda et al. (2023)	TA	S	S	S	S	N	N	S	S	—	75	Alta
Michel et al. (2025)	TA	S	S	S	S	PC	N	S	S	—	75	Alta
Pacheco Flores de Valgaz et al. (2022)	TA	S	S	S	S	PC	N	S	S	—	75	Alta
Stewart et al. (2026)	TA	S	S	S	S	S	S	S	S	—	100	Alta
Avila-Salem et al. (2020)	TA	S	S	S	S	N	N	S	PC	—	63	Moderada
Vivanco Galván et al. (2020)	TA	S	S	S	S	N	N	S	PC	—	63	Moderada

Nota. CE: lista JBI para estudios cuasiexperimentales, versión revisada (Barker et al., 2024). P1, relación causa–efecto clara; P2, grupo testigo; P3, grupos comparables; P4, manejo similar salvo la inoculación; P5, mediciones repetidas antes y después de la intervención; P6, variables medidas de igual forma entre grupos; P7, medición fiable de las variables; P8, seguimiento completo o pérdidas descritas; P9, análisis estadístico apropiado. TA: lista JBI para estudios transversales analíticos (Moola et al., 2024). P1, criterios de inclusión de la muestra definidos; P2, sitio y muestras descritos en detalle; P3, exposición (sitio, manejo o uso del suelo) medida de forma válida; P4, criterios estándar para caracterizar la comunidad; P5, factores de confusión identificados; P6, estrategias frente a la confusión; P7, variables de respuesta medidas de forma válida y fiable; P8, análisis estadístico apropiado. S: sí; N: no; PC: poco claro; —: ítem inexistente en la herramienta. %: respuestas S sobre ítems aplicables. Calidad alta ≥ 70 %; moderada 50–69 %; baja < 50 %. La evaluación ítem por ítem con su justificación se presenta en la Tabla S4.

Sin control de la confusión, una diferencia de composición entre dos manejos puede deberse al pH o al fósforo del suelo y no al manejo, de modo que esas diferencias deben leerse como asociaciones. La calificación alta de 19 estudios refleja que cumplen la mayoría de los ítems, no que estén libres de estas dos fuentes de sesgo. La Tabla 10 muestra qué conclusiones se debilitan al considerarlas.

3.8. De bioinsumo a recurso bioeconómico potencial. Con la evidencia reunida, proponemos tratar a los consorcios nativos de HMA como recursos bioeconómicos potenciales y ya no solo como bioinsumos. Las especies de HMA difieren en cuánto aumentan la absorción de fósforo y microelementos en suelos pobres, lo que abre la posibilidad de sustituir parte del fertilizante sintético; las sinergias con enmiendas orgánicas de baja calidad, en cambio, no siempre aparecen (Marrassini et al., 2026). La inoculación también mitigó los cambios que los microplásticos provocan en las comunidades de nematodos del suelo (Yue et al., 2026). Respecto al carbono, los HMA aportan a la estructura del suelo mediante las proteínas relacionadas con la glomalina (GRSP), que intervienen en la retención de nitrógeno orgánico y en la estabilidad de agregados, aunque la GRSP no sirve como indicador único (Nagy et al., 2026).

La Tabla 11 reúne los componentes de costo y beneficio, y clasifica cada uno como medido, inferido o no cuantificado. Ninguno de los 25 estudios incluidos reportó costos ni indicadores económicos; los indicadores publicados que existen proceden de fuentes de contexto y de sistemas distintos a los consorcios nativos tropicales. En papa, un análisis de 231 ensayos de campo en Norteamérica y Europa con un inoculante comercial de *Rhizophagus irregularis* registró un aumento medio de 3,9 t ha^{-1} (9,5 %) en el rendimiento comercial; la inoculación resultaba rentable con un aumento de 0,67 t ha^{-1}, umbral que se alcanzó en casi el 79 % de los ensayos (Hijri, 2016).

Tabla 10
Conclusiones de la revisión y efecto de las limitaciones metodológicas sobre la confianza

Conclusión	Evidencia que la sostiene	Limitación (ítem JBI)	Confianza resultante
Los consorcios nativos mejoran nutrición o rendimiento frente a no inocular	3 ensayos de campo con inóculo nativo, local o adaptado, 2 de ellos tropicales	Sin medición previa a la inoculación (P5); pérdidas poco claras en 2 (P8)	Moderada; limitada a los cultivos y suelos ensayados
Los consorcios nativos superan a los inoculantes comerciales no adaptados	2 ensayos de invernadero incluidos (Symanczik et al., 2017; Viera et al., 2017), favorables o equivalentes al inóculo nativo; contexto (Kouadio et al., 2017; Koziol et al., 2025) y tres reportes no recuperados (sección 3.13)	Sin ensayos de campo; medición única (P5)	Baja; hipótesis pendiente de ensayos de campo
El manejo y el uso del suelo modifican la composición de HMA	10 estudios de comunidades	Confusión no controlada en 9 (P6)	Asociación consistente; causalidad no demostrada
Los mecanismos fisiológicos explican el beneficio en campo	1 revisión de ensayos controlados	Sin evaluación en campo	Baja
El efecto de la inoculación persiste más de un ciclo	1 ensayo de campo en Italia (Marrassini et al., 2026): una inoculación antes del maíz mantuvo efectos sobre el rendimiento y los nutrientes del trigo al año siguiente	Sin medición previa (P5); la identificación morfológica no separa el inóculo de los HMA residentes; inóculo no nativo	Baja; un solo ensayo, fuera del trópico
La Amazonía es la región con menos caracterización de HMA en agroecosistemas	Recuento de estudios (Tabla 7): un estudio, con suelos de naranjilla en cultivos trampa	26 reportes sobre Ecuador no recuperados a texto completo (sección 3.13)	Baja

Tabla 11
Costos y beneficios potenciales de la inoculación con HMA según el tipo de evidencia disponible

Componente	Evidencia disponible	Referencia	Tipo de beneficio o costo	Ámbito
Producción del inóculo	Ningún estudio incluido lo reporta. En yuca, la rentabilidad dependió del precio y la dosis del inóculo	Ceballos et al. (2013)	Medido (contexto)	Colombia; inóculo *in vitro* no nativo
Fertilizante ahorrado	Consorcios nativos con dosis reducidas de fertilizante mineral mejoraron nutrición y rendimiento	Akpodé et al. (2024)	Inferido; sin valoración monetaria	Benín; incluido
Fertilizante ahorrado	Ensayos con hasta 50% menos NPK sin pérdida de rendimiento	Ghorui et al. (2025)	Medido en esos ensayos; sin costos	Varios países; contexto
Sustitución de fósforo	+28% de rendimiento sin P; sin efecto con 20 kg ha^{-1} de P_2O_5	Njaramanana et al. (2022)	Medido (contexto)	Madagascar; inóculo comercial
Cambio en rendimiento	Aumento en soja y algodón; +20,4% en yuca; +3,9 t ha^{-1} (9,5%) en papa	Cely et al. (2016); Ceballos et al. (2013); Hijri (2016)	Medido	Brasil (incluido); Colombia y zona templada (contexto)
Indicador económico publicado	Rentable con aumento ≥ 0,67 t ha^{-1}; umbral alcanzado en casi 79% de 231 ensayos	Hijri (2016)	Medido (contexto)	Papa; Norteamérica y Europa; inóculo comercial
Costo de aplicación	No reportado	—	No cuantificado	—
Persistencia del efecto	Una inoculación antes del maíz mantuvo efectos sobre el trigo del año siguiente	Marrassini et al. (2026)	Medido en un ensayo; sin valoración económica	Italia; inóculo no nativo; incluido
Servicios ecosistémicos	Agregación, GRSP, tolerancia a metales y control de nematodos descritos sin valoración	Akter et al. (2024); Nagy et al. (2026); Xia et al. (2023); Corazon-Guivin et al. (2024)	No cuantificado en términos monetarios	Varios

Nota. Medido: cuantificado en un ensayo con testigo. Inferido: deducido de un resultado agronómico sin medición económica. No cuantificado: descrito sin medición. "Contexto" indica fuentes que no forman parte de los 25 estudios incluidos.

En yuca, en Colombia, la inoculación aumentó el rendimiento de raíces frescas en 20,4 % en uno de dos sitios, pero con precios europeos del inóculo y el doble de la dosis recomendada no superó el retorno del cultivo convencional; con la mitad de la dosis y el mismo rendimiento habría sido rentable (Ceballos et al., 2013). En arroz de secano de Madagascar, un inoculante comercial aumentó el rendimiento en 28 % sin fertilización fosfatada, pero no tuvo efecto cuando se aplicaron 20 kg ha^{-1} de

P_2O_5, y el fertilizante fosfatado solo aumentó el rendimiento en 85 % (Njaramanana et al., 2022).

Los ensayos que combinan HMA con dosis reducidas de fertilizante (Akpodé et al., 2024) o con rizobios (Yonas & Zawar, 2024) dan una primera base para estimar cuánto insumo se ahorra. Una revisión reciente sobre formulaciones comerciales reúne ensayos de campo en los que la inoculación permitió bajar hasta 50 % la dosis de NPK sin perder rendimiento, aunque reconoce que casi no hay comparaciones directas de costo entre inoculantes y fertilizantes (Ghorui et al., 2025). Estos datos permiten distinguir tres tipos de beneficio. Los medidos son los cambios de rendimiento y de nutrición frente a testigos sin inocular. Los inferidos son el ahorro de fertilizante y su valor monetario, que se deducen de esos ensayos sin haberse calculado. Los no cuantificados son los servicios ecosistémicos (agregación, carbono, sanidad del suelo). La persistencia del efecto se midió en un solo ensayo de zona templada, donde una inoculación antes del maíz siguió favoreciendo al trigo del año siguiente (Marrassini et al., 2026); si esto se confirma en suelos tropicales, el costo del inóculo podría repartirse entre varias campañas. La valoración monetaria de los HMA nativos en Ecuador es, por tanto, una agenda futura y no un resultado demostrado. En Ecuador faltan tres cosas para dar ese paso. Primero, series de campo de varias campañas que midan la respuesta del rendimiento a aislados nativos. Segundo, protocolos de propagación que produzcan inóculo de calidad constante a escala comunitaria (Gagou et al., 2026; Naranjo-Morán et al., 2025; Naranjo-Moran et al., 2026). Tercero, métricas monetarias que conviertan el ahorro de fertilizante y la mejora del suelo en indicadores comparables. Mientras eso no exista, lo defendible es hablar de recurso potencial, sujeto a validación agronómica y económica.

3.9. Extensión agrícola y cocreación de conocimiento. Esta sección distingue dos tipos de contenido: la evidencia publicada sobre prácticas campesinas y una propuesta de intervención de los autores. La transición a una agricultura sostenible avanza mejor cuando la genómica, la ecología funcional y el conocimiento local se retroalimentan, en lugar de una transferencia de tecnología en un solo sentido. En cuanto a la evidencia publicada, varias prácticas campesinas e indígenas, como la labranza mínima y el uso de abonos orgánicos, coinciden con las que mantienen la diversidad de HMA (Lucas et al., 2025). En campo, un consorcio local mejoró rasgos agronómicos del girasol sin desplazar a los HMA que ya colonizaban la raíz (Arcidiacono et al., 2025), lo que respalda el uso de inóculos de origen local. Para la observación en finca existen tinciones de bajo costo con extractos de cúrcuma o de cáscara de granada, que dejan ver las estructuras micorrízicas con menor toxicidad que los colorantes sintéticos (Karmakar & Chakraborty, 2026). El cultivo monoxénico de órganos radiculares genera inóculo abundante y sin contaminantes a partir de un aislado nativo (Gagou et al., 2026), aunque por sí solo no demuestra ventaja en campo. La multiplicación *in vivo* con plantas trampa y sustratos locales conserva la funcionalidad de los propágulos y se puede llevar a escala comunitaria (Naranjo-Morán et al., 2025). El hospedador trampa filtra lo que se multiplica: en suelos de Kenia, cultivos trampa de variedades tradicionales de maíz, sorgo y frijol recuperaron 32 especies de HMA frente a 26 halladas en el suelo de campo, pero 12 especies presentes en ese suelo no se propagaron (Sakha et al., 2025).

Lo que sigue es una propuesta de los autores y no un resultado de la revisión. Proponemos bancos comunitarios de inóculo gestionados con las organizaciones de productores, que usen varios hospedadores locales para no perder parte de la diversidad nativa. La participación tendría tres mecanismos: la elección conjunta de los sitios de muestreo y de las fincas de ensayo, la evaluación de resultados con criterios definidos por los productores además de los agronómicos, y la formación en evaluación visual del suelo y en tinciones de bajo costo. Cuando el aislado provenga de un territorio comunitario o se use conocimiento asociado, el acceso requeriría consentimiento previo informado y un acuerdo de reparto de beneficios conforme al Decreto Ejecutivo 905 y al Protocolo de Nagoya (sección 3.11). El reconocimiento del conocimiento tradicional quedaría registrado en los metadatos de origen de cada aislado en el repositorio nacional. La Tabla 12 propone indicadores para medir la adopción, la accesibilidad tecnológica y el desempeño de estos bancos.

3.10. Infraestructura de vigilancia y conservación genómica. Conservar la diversidad fúngica del suelo y usarla en la agricultura requiere una infraestructura científica y comunitaria repartida en el territorio. Universidades e institutos pueden encabezar campañas de metabarcoding de ADN ambiental en suelos andinos y tropicales; la secuenciación de alto rendimiento detecta y cataloga taxones que la taxonomía morfológica no distingue (Větrovský et al., 2023).

Tabla 12
Indicadores propuestos de adopción, accesibilidad y desempeño de los bancos comunitarios de inóculo

Dimensión	Indicador	Forma de medición
Adopción	Fincas que usan inóculo del banco	Proporción de fincas participantes que lo aplican en dos o más campañas consecutivas
Accesibilidad tecnológica	Costo relativo del inóculo	Costo por hectárea del inóculo frente al costo del fertilizante que sustituye
Accesibilidad tecnológica	Capacidad local de producción	Número de productores capacitados que producen inóculo sin apoyo externo
Desempeño del banco	Calidad del lote	Proporción de lotes que cumplen el umbral de propágulos infectivos y la ausencia de patógenos
Desempeño del banco	Conservación de la diversidad	Número de taxones del inóculo frente a los del suelo de origen (marcador común)
Desempeño del banco	Efecto en campo	Diferencia de rendimiento frente a parcelas testigo en las fincas de los usuarios
Reparto de beneficios	Acuerdos vigentes	Número de acuerdos de acceso y reparto de beneficios firmados con comunidades de origen

Las técnicas multigénicas sirven luego para validar y seleccionar ecotipos. Entre los candidatos a taxones centinela se han propuesto *Gigaspora albida* y *Rhizophagus clarus*, por su tolerancia térmica en condiciones tropicales (Demir et al., 2022; Dhiman et al., 2022). En *Acorus calamus*, la inoculación con HMA mejoró la tolerancia al cromo y modificó la comunidad fúngica de la rizosfera (Xia et al., 2023), un resultado útil para suelos degradados. Hacen falta, además, repositorios nacionales de acceso abierto que, junto con GlobalAMFungi (Větrovský et al., 2023) y colecciones vivas de referencia como INVAM (Stürmer et al., 2021), protejan frente a la biopiratería y dejen documentado el patrimonio genético del suelo.

La Figura 4 integra estos componentes en un marco para Ecuador, propuesto por los autores, que conecta la vigilancia genómica, la conservación y la valorización biotecnológica. El flujo va del muestreo territorial pareado a los laboratorios regionales, de ahí a un repositorio nacional de secuencias y a una colección viva, y continúa con la selección funcional, la validación en campo, el registro del bioinsumo y la evaluación económica, cuyos resultados indican dónde muestrear después. La gobernanza atraviesa todas las etapas: contratos de acceso y consentimiento previo, reparto de beneficios, trazabilidad, bioseguridad y datos abiertos con salvaguardas.

3.11. Marco regulatorio y dimensión biocultural en Ecuador. El avance biotecnológico necesita una gobernanza del suelo actualizada. Los protocolos de aprobación de agroquímicos pocas veces consideran las condiciones edafoclimáticas de los trópicos y los Andes, y así se autorizan fungicidas y pesticidas que afectan el microbioma del suelo y sus redes micorrízicas (EFSA PPR Panel et al., 2017). La clasificación de los inoculantes micorrízicos como biofertilizantes o bioestimulantes, y la cantidad mínima de propágulos viables que se exige, cambian de un país a otro (Ghorui et al., 2025). Salomon et al. (2022) propusieron un marco de gestión de calidad con criterios mínimos y un bioensayo estandarizado de viabilidad y eficacia, que podría servir de modelo para registrar en Ecuador bioinsumos elaborados con consorcios nativos.

La Tabla 13 resume las normas ecuatorianas aplicables al acceso a recursos genéticos, al registro de bioinsumos, a la propiedad intelectual y al reparto de beneficios; su vigencia se consultó en el Centro de Intercambio de Información sobre Acceso y Participación en los Beneficios del Convenio sobre la Diversidad Biológica, en FAOLEX/ECOLEX y en el portal gob.ec en octubre de 2026. De ellas se derivan obligaciones ya vigentes.

Quien recolecte HMA nativos para investigación o para desarrollar un bioinsumo accede a un recurso genético del Estado y, conforme a la Decisión 391 y al Decreto Ejecutivo 905, necesita una autorización o un contrato de acceso con la Autoridad Ambiental Nacional; si interviene conocimiento de una comunidad, también su consentimiento previo informado. El bioinsumo resultante debe registrarse ante AGROCALIDAD antes de comercializarse. La Constitución prohíbe la apropiación de recursos genéticos y de conocimientos colectivos (arts. 57 y 322) y el otorgamiento de derechos de propiedad intelectual sobre productos derivados del conocimiento colectivo asociado a la biodiversidad (art. 402), lo que limita qué puede patentarse en formulaciones con consorcios nativos.

A partir de ese marco recomendamos tres medidas regulatorias. La primera es fijar, en la normativa de registro de AGROCALIDAD, requisitos técnicos específicos para inoculantes de HMA (propágulos infectivos por unidad, viabilidad, ausencia de patógenos e identidad del aislado), que no identificamos

en la normativa revisada y que otros países ya establecen (Ghorui et al., 2025; Salomon et al., 2022). La segunda es exigir en el registro la declaración del origen geográfico del aislado y el número del contrato de acceso, lo que enlaza el control sanitario con el de recursos genéticos. La tercera es un procedimiento simplificado de acceso para la investigación universitaria sin fines comerciales, en el marco de la coordinación prevista por el Acuerdo SENESCYT-MAE-2018-001.

Las responsabilidades institucionales quedarían repartidas así: la Autoridad Ambiental Nacional autoriza el acceso y custodia los contratos; la SENESCYT, integrada en 2025 como viceministerio al Ministerio de Educación (Presidencia de la República del Ecuador, 2025), coordina la investigación y la propiedad intelectual conforme al COESCCI; AGROCALIDAD registra y controla los bioinsumos; y las universidades mantienen las colecciones vivas y el repositorio de secuencias. Para que el acceso abierto no facilite la apropiación indebida, cada secuencia o aislado publicado llevaría su código de origen y su número de contrato, la transferencia de material vivo se haría con acuerdos que obliguen a declarar el origen en cualquier solicitud de patente, y los datos sensibles de localización de comunidades podrían publicarse con menor resolución.

La protección territorial es otro problema. Menos de una décima parte de los puntos calientes mundiales de riqueza micorrízica está dentro de áreas protegidas (Van Nuland et al., 2025), pese a que la conservación *in situ* de HMA en parques y reservas se planteó hace más de una década (Turrini & Giovannetti, 2012). En la sierra, la costa y la Amazonía persisten prácticas agrícolas tradicionales compatibles con la conservación de la red micorrízica nativa. Reconocer la simbiosis como parte de la gestión ancestral del territorio permitiría unir su valor agronómico con su valor biocultural, y es la razón para tratar a los consorcios nativos como activos bioculturales.

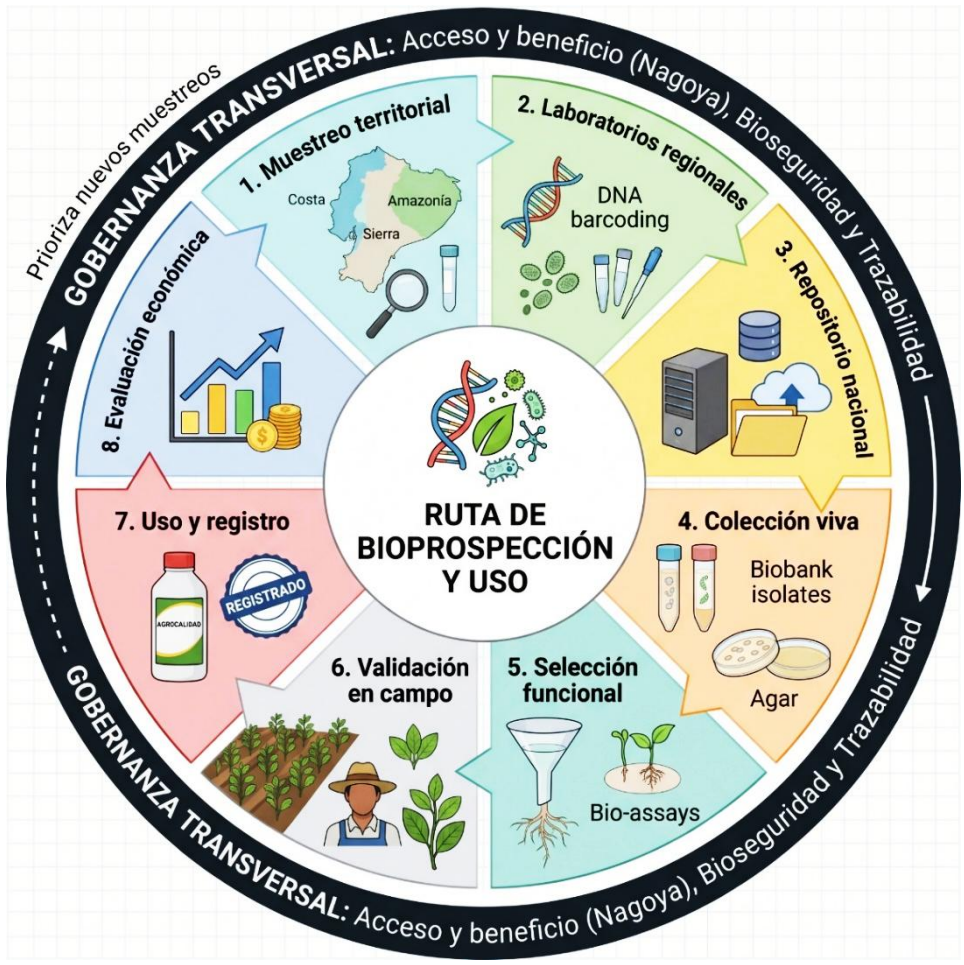


Figura 4. Marco integrado propuesto para la vigilancia genómica, la conservación y la valorización biotecnológica de HMA nativos en Ecuador. Las etapas 1 a 4 generan y resguardan información y germoplasma; las etapas 5 a 8 los convierten en bioinsumos evaluados. La flecha discontinua indica la retroalimentación hacia nuevos muestreos.

Tabla 13
Normas aplicables en Ecuador al acceso, uso y registro de HMA nativos

Instrumento	Publicación	Alcance pertinente	Implicación para HMA nativos
Constitución de la República del Ecuador (Asamblea Constituyente, 2008)	Registro Oficial 449, 20/10/2008	Arts. 57 (num. 12), 322, 400 y 402: soberanía sobre la biodiversidad; prohibición de apropiarse de recursos genéticos y conocimientos colectivos; prohibición de derechos de propiedad intelectual sobre productos derivados del conocimiento colectivo	Los consorcios nativos son recurso genético del Estado; limita la patentabilidad de productos basados en conocimiento colectivo
Decisión 391 de la Comunidad Andina (Comunidad Andina, 1996)	Gaceta Oficial del Acuerdo de Cartagena 213	Régimen común de acceso a recursos genéticos; contrato de acceso	Se aplica al uso de aislados nativos en investigación o desarrollo de bioinsumos
Decreto Ejecutivo 905 (Presidencia de la República del Ecuador, 2011)	Registro Oficial Suplemento 553, 11/10/2011	Reglamento nacional de la Decisión 391; autoridad ambiental como autoridad competente; contrato de acceso; consentimiento previo informado para el componente intangible	Procedimiento de acceso y consulta a comunidades
Protocolo de Nagoya	Ecuador es Parte desde el 19/12/2017 (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, s. f.)	Acceso y participación justa y equitativa en los beneficios	Reparto de beneficios con comunidades y con el Estado
Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación (COESCCI; Asamblea Nacional del Ecuador, 2016)	Registro Oficial Suplemento 899, 09/12/2016	Requisitos de acceso a recursos biológicos y genéticos con fines de investigación o comerciales; conocimientos tradicionales; cláusulas contractuales modelo	Rige la investigación y la propiedad intelectual sobre aislados y formulaciones
Acuerdo Interministerial SENESCYT-MAE-2018-001 (SENESCYT & Ministerio del Ambiente, 2018)	2018	Coordinación interinstitucional de autorizaciones, permisos y contratos de acceso	Trámite para proyectos universitarios
Código Orgánico del Ambiente (Asamblea Nacional del Ecuador, 2017a) y su Reglamento (Decreto Ejecutivo 752; Presidencia de la República del Ecuador, 2019)	Registro Oficial Suplemento 983, 12/04/2017; Registro Oficial Suplemento 507, 12/06/2019	Normas de acceso a recursos biológicos y genéticos aplicables en el país	Permisos de investigación y colecta
Ley Orgánica de Sanidad Agropecuaria (Asamblea Nacional del Ecuador, 2017b); Resolución 0046 (AGROCALIDAD, 2017)	Registro Oficial Suplemento 27, 03/07/2017; Registro Oficial 1009, 22/05/2017	AGROCALIDAD como autoridad competente en fertilizantes, incluidos los biológicos	Registro del bioinsumo antes de su comercialización

Nota. Vigencia consultada en octubre de 2026 en el Centro de Intercambio de Información sobre Acceso y Participación en los Beneficios (CDB), FAOLEX/ECOLEX y gob.ec.

3.12. Marco de soberanía biotecnológica. El marco de soberanía biotecnológica es el aporte conceptual central de este trabajo y una propuesta de los autores. Lo definimos como la capacidad de un país para caracterizar, conservar, validar y aprovechar sus recursos genéticos del suelo con infraestructura, normas y beneficios propios, sin depender de inoculantes importados. La Tabla 14 organiza las acciones propuestas en tres dimensiones, técnica, política y económica, e incluye para cada una indicadores que permitirían evaluar si el marco cumple su función. El mapeo molecular aporta la evidencia que requiere la protección del patrimonio genético; esa protección, a su vez, crea las condiciones para validar y escalar los HMA nativos como recursos que reducen la dependencia externa. Sin caracterización molecular no hay base legal para proteger estos recursos, y sin protección no hay incentivo para invertir en ellos como bioinsumos locales (Figura 5).

El marco toma elementos de cuatro enfoques previos y los articula (Tabla 15). El marco de gestión de calidad de Salomon et al. (2022) fija criterios para productos comerciales, pero no considera el origen del aislado ni el reparto de beneficios. La conservación *in situ* en áreas protegidas (Turrini & Giovannetti, 2012; Van Nuland et al., 2025) protege la diversidad, pero no la conecta con el uso productivo.

Tabla 14
Marco de soberanía biotecnológica: dimensiones, acciones, objetivos e indicadores

Dimensión	Acción propuesta	Objetivo	Indicador de utilidad	Referencias
Técnica	Metabarcoding y vigilancia genómica liderados por el ámbito académico; validación de ecotipos centinela	Mapear ecorregiones tropicales y andinas y reducir la brecha de conocimiento molecular	Proporción de ecorregiones con agroecosistemas caracterizados; número de aislados con secuencia de referencia en colección	Větrovský et al. (2023); Cardoso et al. (2017)
Política	Repositorios de acceso abierto y bancos comunitarios de germoplasma; actualización de protocolos de riesgo agroquímico; requisitos técnicos de registro para inoculantes de HMA	Proteger frente a la biopiratería y evaluar riesgos edafoclimáticos reales	Número de contratos de acceso con reparto de beneficios; bioinsumos con HMA nativos registrados con origen declarado	Akter et al. (2024); Stürmer et al. (2021); EFSA PPR Panel et al. (2017); Salomon et al. (2022); Ghorui et al. (2025)
Económica	Valoración de consorcios nativos como bioinsumos que sustituyen parcialmente insumos químicos; conservación *in vivo* con plantas trampa	Desarrollo bioeconómico local y reducción de la vulnerabilidad alimentaria	Relación beneficio/costo en ensayos de campo de dos o más campañas; proporción del fertilizante sustituido sin pérdida de rendimiento	Akpodé et al. (2024); Marrassini et al. (2026); Naranjo-Morán et al. (2025)

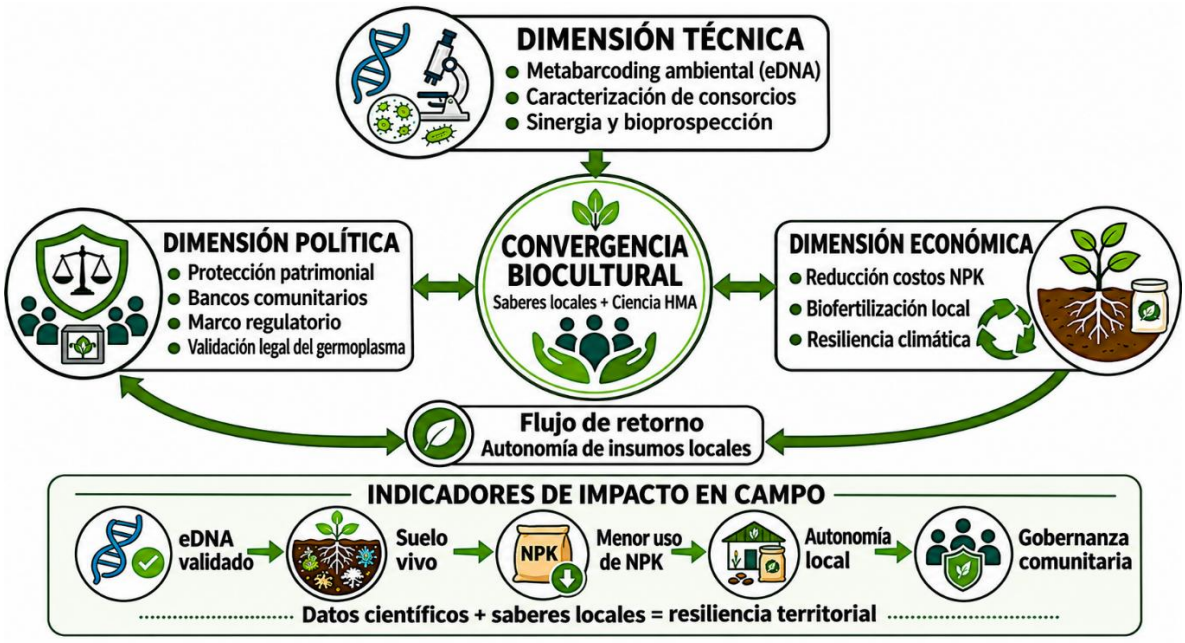


Figura 5. Marco de soberanía biotecnológica propuesto por los autores: dimensiones técnica, política y económica, articuladas por la convergencia biocultural, con indicadores de impacto en campo. La figura sintetiza una propuesta combinada con la revisión y no un resultado empírico.

Tabla 15
Comparación del marco de soberanía biotecnológica con marcos previos

Marco previo	Foco	Qué no cubre	Qué añade el marco propuesto
Gestión de calidad de inoculantes comerciales (Salomon et al., 2022)	Viabilidad, eficacia y contaminación del producto	Origen del aislado; reparto de beneficios	Origen nativo declarado y trazabilidad territorial del lote
Conservación *in situ* en áreas protegidas (Turrini & Giovannetti, 2012; Van Nuland et al., 2025)	Protección de la diversidad de HMA	Uso productivo y validación agronómica	Vínculo entre conservación, colección viva y bioinsumo
Acceso y participación en los beneficios (Decisión 391; Protocolo de Nagoya)	Régimen legal sobre recursos genéticos	Criterios técnicos y agronómicos	Validación agronómica y económica como condición de valor
Bases de datos y colecciones globales (Větrovský et al., 2023; Stürmer et al., 2021)	Datos de ocurrencia y germoplasma de referencia	Gobernanza nacional y uso local	Repositorio nacional con metadatos de origen y contrato de acceso

El régimen de acceso y participación en los beneficios (Decisión 391; Protocolo de Nagoya) regula la dimensión legal sin criterios agronómicos. Las bases y colecciones globales (Větrovský et al., 2023; Stürmer et al., 2021) ofrecen datos y germoplasma de referencia sin gobernanza nacional. El marco propuesto agrega la condición de que el valor de un consorcio nativo se demuestre con validación agronómica y económica en el territorio de origen, y vincula esa validación con el registro, la trazabilidad y el reparto de beneficios.

La Figura 6 propone una ruta de implementación por fases que conecta la caracterización molecular, la validación agronómica, el escalamiento productivo y la evaluación económica. Cada fase termina en un criterio de paso verificable; si no se cumple, el programa vuelve a la fase anterior en lugar de avanzar. La evaluación económica se ubica al final porque necesita los datos de rendimiento y de costo de las fases previas, aunque su diseño (qué costos registrar) debe acordarse desde la fase 2.

3.13. Análisis crítico: fortalezas, limitaciones y oportunidades. Una fortaleza de esta literatura es que los ensayos de campo incluidos registran mejoras de nutrición o rendimiento frente a testigos sin inocular, y que dos ensayos incluidos y uno de contexto obtuvieron resultados favorables o equivalentes para los aislados nativos frente a inóculos comerciales o exóticos (Kouadio et al., 2017; Symanczik et al., 2017; Viera et al., 2017) y un metaanálisis que documenta el bajo desempeño de inoculantes comerciales de origen global (Koziol et al., 2025). Además, las bases de datos moleculares y las colecciones vivas ya ofrecen una infraestructura verificable para seleccionar ecotipos (Stürmer et al., 2021; Větrovský et al., 2023). En la evaluación con JBI, 19 de los 24 estudios primarios obtuvieron calidad alta (Tabla 9).

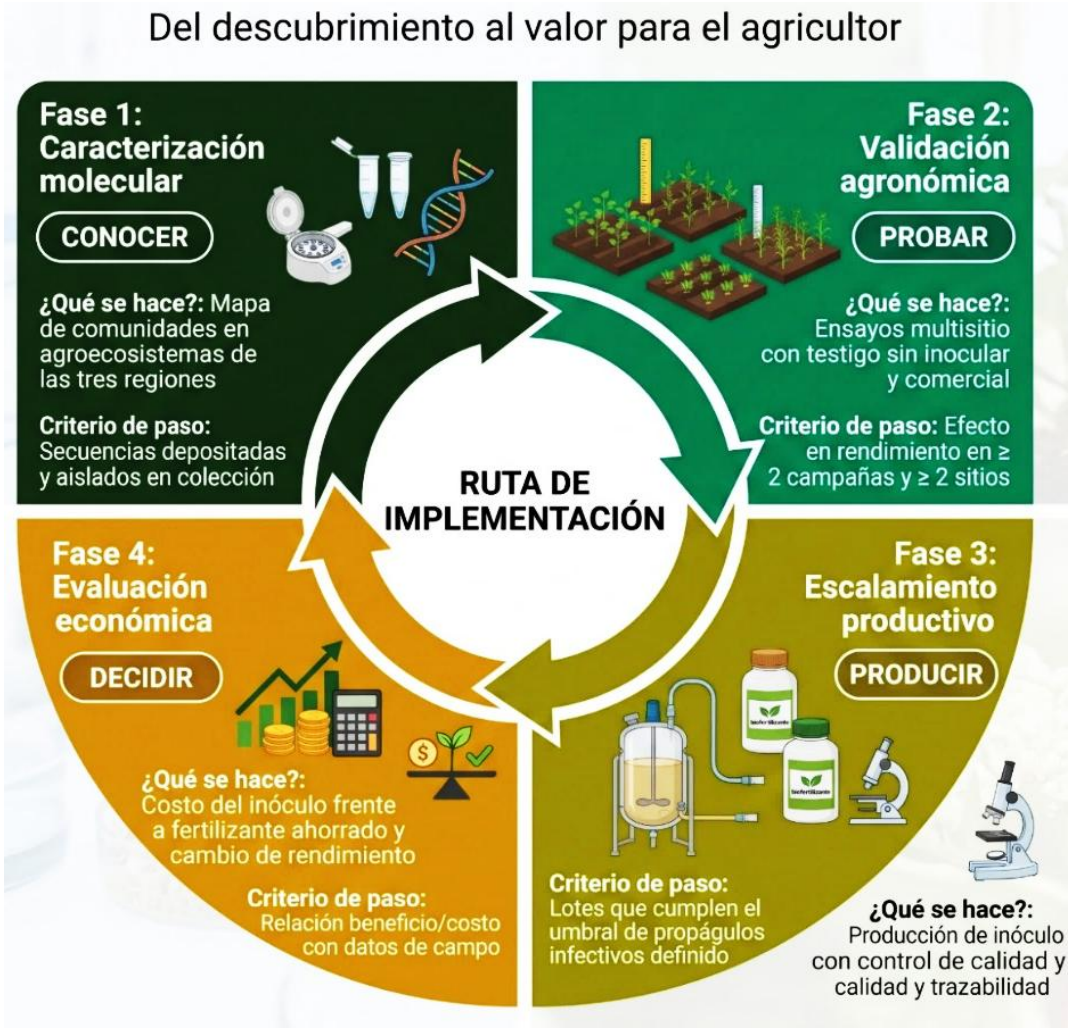


Figura 6. Ruta de implementación por fases propuesta para Ecuador. Cada fase tiene un criterio de paso verificable antes de avanzar a la siguiente.

Las limitaciones también son evidentes. Buena parte de la evidencia mecanicista viene de ensayos controlados, lo que limita su extrapolación a campo (Boyno et al., 2025). La respuesta a la inoculación depende del contexto y no siempre es positiva (Hoeksema et al., 2010; Marrassini et al., 2026), así que cualquier afirmación sobre la superioridad de los HMA nativos debe limitarse a las condiciones ensayadas. La valoración económica sigue siendo cualitativa, sin indicadores sólidos de costo-beneficio ni cifras monetarias de los servicios ecosistémicos, y por eso usamos el término potencial. En Ecuador la cobertura molecular es desigual y en agroecosistemas amazónicos solo hay un estudio basado en cultivos trampa. La limitación más importante es de cobertura: 79 de los 92 reportes potencialmente elegibles no se recuperaron a texto completo durante la revisión y no entraron en la síntesis, de modo que el conjunto incluido depende en buena parte de las listas de referencias (14 de 25 estudios). Según sus resúmenes, esos reportes contienen al menos tres comparaciones entre inóculos nativos y comerciales o exóticos, una de ellas en campo (Quilambo et al., 2005; Séry et al., 2016; Tchabi et al., 2010), y 26 trabajos sobre HMA en Ecuador. Las conclusiones sobre esas dos cuestiones son provisionales hasta evaluar esos textos, y la Tabla S2 permite completar la revisión con la misma búsqueda. La búsqueda tampoco recuperó la comparación de campo en ñame de Kouadio et al. (2017). Al menos seis estudios primarios se hicieron fuera de los trópicos y tres ensayos usaron inóculo no nativo del sitio (Xia et al., 2023; Yue et al., 2026; Marrassini et al., 2026), aunque ninguno de ellos sostiene las conclusiones sobre desempeño en suelos tropicales. Por último, esta revisión no registró un protocolo previo y no incluye metaanálisis, por lo que no estima tamaños de efecto; la evaluación con JBI compensa en parte esa limitación porque deja explícita la calidad de cada estudio.

De estos vacíos salen las oportunidades. Ensayos de campo de varios años en cultivos de alto valor como *Theobroma cacao* podrían cuantificar en términos económicos los servicios de los HMA nativos (Pacheco Flores de Valgaz et al., 2022). Los protocolos de secuenciación pueden ajustarse para detectar taxones raros, y los métodos de propagación escalables aumentarían la disponibilidad de inóculo nativo (Gagou et al., 2026; Naranjo-Morán et al., 2025; Naranjo-Moran et al., 2026). Plataformas participativas que junten el conocimiento local con el diagnóstico molecular ayudarían a afinar los marcos de valoración y a dar a los HMA un lugar en la política de desarrollo rural. La Tabla 16 cierra la discusión con 4 brechas priorizadas, su importancia científica y la evidencia que permitiría resolverlas.

4. Conclusiones

Los 25 estudios incluidos muestran que los consorcios nativos de HMA pueden mejorar la nutrición y el rendimiento de cultivos frente a testigos sin inocular, y que el manejo y el uso del suelo se asocian con cambios en la composición de sus comunidades. La evidencia agronómica de campo proviene de cuatro ensayos, dos de ellos tropicales y tres con inóculo nativo, local o adaptado; ninguno midió la respuesta antes de inocular y solo uno siguió el efecto en un segundo cultivo. La ventaja de los consorcios nativos sobre los inoculantes comerciales tiene apoyo en 2 ensayos de invernadero ecuatorianos, con resultados favorables o equivalentes al inóculo nativo, pero ningún estudio incluido la evaluó en campo, por lo que sigue siendo una hipótesis.

Tabla 16
Brechas de investigación priorizadas

Prioridad	Brecha	Importancia científica	Evidencia que permitiría resolverla
1	Ningún estudio incluido compara en campo consorcios nativos e inoculantes comerciales; las dos comparaciones incluidas son de invernadero	Es la premisa del valor bioeconómico de lo nativo; sin ella la ventaja es una hipótesis	Ensayos multisitio de dos o más campañas con testigo sin inocular, inoculante comercial y consorcio nativo, con rastreo molecular del inóculo
2	Ningún estudio incluido reporta indicadores económicos	Sin costos no puede hablarse de activo bioeconómico	Registro de costo del inóculo, aplicación, fertilizante ahorrado y rendimiento en los mismos ensayos; relación beneficio/costo
3	La caracterización de HMA en agroecosistemas amazónicos se limita a un estudio con cultivos trampa	Sin línea de base no es posible seleccionar consorcios locales ni proteger el recurso	Campañas con los indicadores de la Tabla 8 en cacao, café y chakras amazónicas
4	Los mecanismos fisiológicos no se han medido en campo	Explicarían por qué el efecto varía entre suelos y hospedadores	Medición en campo de estado hídrico y actividad antioxidante junto con el rendimiento, en los mismos ensayos de la prioridad 1

Ninguno de los estudios incluidos reportó indicadores económicos, de modo que consideramos a estos consorcios recursos bioeconómicos potenciales y no activos demostrados. Como 79 de los 92 reportes potencialmente elegibles no se evaluaron a texto completo, estas conclusiones describen el conjunto incluido y no toda la evidencia publicada.

En Ecuador, los estudios incluidos caracterizan HMA en cacao en la costa y en maíz, papa, pastizal y tomate de árbol en los Andes; en la Amazonía solo hay un estudio con suelos de plantaciones de naranjilla, analizados en cultivos trampa, y los tres ensayos de campo identificados en el país usaron inoculantes importados. Por eso la Amazonía es la prioridad para la vigilancia genómica y los ensayos de campo con consorcios locales son la prioridad agronómica; la búsqueda identificó otros 26 reportes sobre Ecuador cuya evaluación queda pendiente. El marco de soberanía biotecnológica, la secuencia verificable y la ruta por fases son propuestas de los autores. Su utilidad dependerá de ensayos de campo que cumplan una doble condición: validación agronómica, con varias campañas y sitios y con un inoculante comercial como comparador, y validación económica, con registro de costos y beneficios en esos mismos ensayos.

La agenda de investigación que se desprende de esta revisión tiene cuatro puntos, en orden de prioridad: (1) ensayos multisitio en Ecuador que comparen consorcios nativos con inoculantes comerciales y testigos sin inocular durante dos o más campañas; (2) contabilidad de costos y beneficios integrada en esos ensayos para obtener relaciones beneficio/costo; (3) campañas de caracterización con un marcador común y metadatos de suelo en agroecosistemas amazónicos; y (4) medición en campo de los mecanismos fisiológicos que hoy solo se conocen en condiciones controladas. En paralelo, la regulación debería definir requisitos técnicos de registro para inoculantes de HMA y vincular ese registro con el origen del aislado y el contrato de acceso.

Material suplementario: **Tabla S1**, historial de búsqueda (ecuaciones, fecha, campos, filtros y número de registros por base). **Tabla S2**, cribado de los 235 registros con la decisión y el motivo de cada uno, y lista de reportes no recuperados. **Tabla S3**, matriz de extracción de los 25 estudios incluidos. **Tabla S4**, evaluación JBI ítem por ítem, con justificación, de los 24 estudios primarios.

Declaración de uso de inteligencia artificial: Durante la preparación de este trabajo los autores usaron Claude (Anthropic) para el cribado preliminar de títulos y resúmenes, la organización de las matrices de extracción y la revisión de la redacción. Todas las decisiones de cribado, la extracción de datos y la evaluación de calidad fueron revisadas por los autores, que asumen la responsabilidad total del contenido publicado.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses financieros. Tres de los estudios incluidos tienen como coautor a J. Naranjo-Moran (Naranjo-Morán et al., 2025; Naranjo-Moran et al., 2026; Pacheco Flores de Valgaz et al., 2022); su extracción y su evaluación de calidad las hicieron los demás autores.

Contribución de los autores: **J. Naranjo-Moran:** conceptualización, análisis formal, administración del proyecto y redacción (revisión y edición). **G. Dau-Jarama:** metodología, investigación, visualización y redacción. **J. Jaime-Carvajal:** redacción (borrador inicial), análisis de datos, revisión y edición. **J. Ballesteros-Lara:** supervisión, análisis formal y redacción.

ORCID

J. Naranjo-Moran https://orcid.org/0000-0002-4410-9337
G. Dau-Jarama https://orcid.org/0000-0001-5899-2311
J. Jaime-Carvajal https://orcid.org/0000-0001-6206-1181
J. Ballesteros-Lara https://orcid.org/0000-0002-8426-3355

Referencias bibliográficas

Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro (AGROCALIDAD). (2017). *Resolución 0046: Atribuciones y responsabilidades de la Coordinación General de Registros de Insumos Agropecuarios*. Registro Oficial 1009.

Akpodé, C., Assogba, S. A., Hoteyi, S. M. I., Aguégué, M. R., Adoko, M. Y., Alao, L. T., et al. (2024). Impact of combinations of native arbuscular mycorrhizal fungi and mineral fertilizers on the production and nutrition of maize plants on ferruginous soil. *Agricultural Research*, *14*(4), 782–793. https://doi.org/10.1007/s40003-024-00808-5

Akter, S., Kamruzzaman, Sarder, P., Amin, S., Joardar, J. C., Islam, S., et al. (2024). Mycorrhizal fungi increase plant nutrient uptake, aggregate stability and microbial biomass in the clay soil. *Symbiosis*, *93*(2), 163–176. https://doi.org/10.1007/s13199-024-00994-4

Alguacil, M. M., Torrecillas, E., García-Orenes, F., & Roldán, A. (2014). Changes in the composition and diversity of AMF communities mediated by management practices in a Mediterranean soil are related with increases in soil biological activity. *Soil Biology and Biochemistry*, *76*, 34–44. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.05.002

Arcidiacono, M., Ercoli, L., Piazza, G., & Pellegrino, E. (2025). Field inoculation with a local arbuscular mycorrhizal fungal consortium promotes sunflower agronomic traits without changing the composition of AM fungi coexisting inside the crop roots. *Applied Soil Ecology*, *206*, 105830. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105830

Arévalo-Granda, V., Hickey-Darquea, A., Prado-Vivar, B., Zapata, S., Duchicela, J., & van 't Hof, P. (2023). Exploring the mycobiome and arbuscular mycorrhizal fungi associated with the rhizosphere of the genus *Inga* in the pristine Ecuadorian Amazon. *Frontiers in Fungal Biology*, *4*, 1086194. https://doi.org/10.3389/ffunb.2023.1086194

Asamblea Constituyente. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Registro Oficial 449, 20 de octubre de 2008.

Asamblea Nacional del Ecuador. (2016). *Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación*. Registro Oficial Suplemento 899.

Asamblea Nacional del Ecuador. (2017a). *Código Orgánico del Ambiente*. Registro Oficial Suplemento 983.

Asamblea Nacional del Ecuador. (2017b). *Ley Orgánica de Sanidad Agropecuaria*. Registro Oficial Suplemento 27.

Avila-Salem, M. E., Montesdeoca, F., Orellana, M., Pacheco, K., Alvarado, S., Becerra, N., et al. (2020). Soil biological properties and arbuscular mycorrhizal fungal communities of

representative crops established in the Andean region from Ecuadorian highlands. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *20*(4), 2156–2163. https://doi.org/10.1007/s42729-020-00283-1

Barker, T. H., Habibi, N., Aromataris, E., Stone, J. C., Leonardi-Bee, J., Sears, K., et al. (2024). The revised JBI critical appraisal tool for the assessment of risk of bias for quasi-experimental studies. *JBI Evidence Synthesis*, *22*(3), 378–388.

Boyno, G., Danesh, Y. R., Çevik, R., Teniz, N., Demir, S., Calayır, O., et al. (2025). Plant–fungus synergy against soil salinity: The cellular and molecular role of arbuscular mycorrhizal fungi. *iScience*, *28*(9), 113384. https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.113384

Capa-Morocho, M., Macas-Camacho, E., Ruilova, E. V., & Abad-Guamán, R. (2024). Influence of mycorrhizal fungi and nitrogen on the growth and yield of white maize in Ecuadorian Andes. *AgriScientia*, *41*(2), 101–112. https://doi.org/10.31047/1668.298x.v41.n2.42721

Carballar-Hernández, S., Hernández-Cuevas, L. V., Montaño, N. M., Larsen, J., Ferrera-Cerrato, R., Taboada-Gaytán, O. R., et al. (2017). Native communities of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Capsicum annuum* L. respond to soil properties and agronomic management under field conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *245*, 43–51. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.004

Cardoso, E. J. B. N., Nogueira, M. A., & Zangaro, W. (2017). Importance of mycorrhizae in tropical soils. In J. Azevedo & M. Quecine (Eds.), *Diversity and benefits of microorganisms from the tropics* (pp. 245–267). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55804-2_11

Ceballos, I., Ruiz, M., Fernández, C., Peña, R., Rodríguez, A., & Sanders, I. R. (2013). The *in vitro* mass-produced model mycorrhizal fungus, *Rhizophagus irregularis*, significantly increases yields of the globally important food security crop cassava. *PLoS ONE*, *8*(8), e70633. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070633

Cely, M. V. T., de Oliveira, A. G., de Freitas, V. F., de Luca, M. B., Barazetti, A. R., dos Santos, I. M. O., et al. (2016). Inoculant of arbuscular mycorrhizal fungi (*Rhizophagus clarus*) increase yield of soybean and cotton under field conditions. *Frontiers in Microbiology*, *7*, 720. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00720

Ciccolini, V., Ercoli, L., Davison, J., Vasar, M., Öpik, M., & Pellegrino, E. (2016). Land-use intensity and host plant simultaneously shape the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities in a Mediterranean drained peatland. *FEMS Microbiology Ecology*, *92*(12), fiw186. https://doi.org/10.1093/femsec/fiw186

Comunidad Andina. (1996). *Decisión 391: Régimen común sobre acceso a los recursos genéticos*. Gaceta Oficial del Acuerdo de Cartagena, 213.

Corazon-Guivin, M. A., Rengifo del Aguila, S., Corrêa, R. X., Cordova-Sinarahua, D., Costa Maia, L., Alves da Silva, D. K., et al. (2024). Native arbuscular mycorrhizal fungi promote *Plukenetia volubilis* growth and decrease the infection levels of *Meloidogyne incognita*. *Journal of Fungi*, *10*(7), 451. https://doi.org/10.3390/jof10070451

De La Cruz, H. J., Marro, N., Caccia, M., Žďárská, K., & Janoušková, M. (2026). Competitive dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi as depending on fungal traits and host plant species. *Mycorrhiza*, *36*, 10. https://doi.org/10.1007/s00572-026-01254-7

Demir, S., Danesh, Y. R., Boyno, G., & Najafi, S. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi in biotic and abiotic stress conditions: Function and management in horticulture. In M. Seymen, E. S. Kurtar, C. Erdinc, & A. Kumar (Eds.), *Sustainable horticulture* (pp. 157–183). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91861-9.00011-2

Dhiman, M., Sharma, L., Kaushik, P., Singh, A., & Sharma, M. M. (2022). Mycorrhiza: An ecofriendly bio-tool for better survival of plants in nature. *Sustainability*, *14*(16), 10220. https://doi.org/10.3390/su141610220

Djotan, A. K. G., Matsuda, Y., Matsushita, N., & Fukuda, K. (2026). Origin and cohabitation of arbuscular mycorrhizal fungi matter: Forest-derived *Gigaspora* species are promising candidates for bioinoculant development in forest tree production. *Mycorrhiza*, *36*, 8. https://doi.org/10.1007/s00572-026-01253-8

EFSA PPR Panel, Ockleford, C., Adriaanse, P., Berny, P., Brock, T., Duquesne, S., et al. (2017). Scientific opinion addressing the state of the science on risk assessment of plant protection products for in-soil organisms. *EFSA Journal*, *15*(2), e04690. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2017.4690

Frew, A., Öpik, M., Oja, J., Vahter, T., Hiiesalu, I., & Aguilar-Trigueros, C. A. (2024). Herbivory-driven shifts in arbuscular mycorrhizal fungal community assembly: Increased fungal competition and plant phosphorus benefits. *New Phytologist*, *241*(5), 1891–1899. https://doi.org/10.1111/nph.19474

Gagou, E., El Yeznasni, H., Chafai, W., Chakroune, K., Abbas, M., Lamkami, T., et al. (2026). Monoxenic root organ culture enables high-yield production of viable indigenous *Rhizophagus irregularis* inoculum for arid oasis agroecosystems. *Microbiology Research*, *17*(1), 28. https://doi.org/10.3390/microbiolres17010028

Garcés-Ruiz, M., Senés-Guerrero, C., Declerck, S., & Cranenbrouck, S. (2019). Community composition of arbuscular mycorrhizal fungi associated with native plants growing in a petroleum-polluted soil of the Amazon region of Ecuador. *MicrobiologyOpen*, *8*(4), e00703. https://doi.org/10.1002/mbo3.703

Ghorui, M., Chowdhury, S., & Burla, S. (2025). Recent advances in the commercial formulation of arbuscular mycorrhizal inoculants. *Frontiers in Industrial Microbiology*, *3*, 1553472. https://doi.org/10.3389/finmi.2025.1553472

Giovannini, L., Palla, M., Agnolucci, M., Avio, L., Sbrana, C., Turrini, A., et al. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi and associated microbiota as plant biostimulants: Research strategies for the selection of the best performing inocula. *Agronomy*, *10*(1), 106. https://doi.org/10.3390/agronomy10010106

Haug, I., Setaro, S., & Suárez, J. P. (2021). Global AM fungi are dominating mycorrhizal communities in a tropical premontane dry forest in Laipuna, South Ecuador. *Mycological Progress*, *20*(6), 837–845. https://doi.org/10.1007/s11557-021-01699-4

Hijri, M. (2016). Analysis of a large dataset of mycorrhiza inoculation field trials on potato shows highly significant increases in yield. *Mycorrhiza*, *26*, 209–214. https://doi.org/10.1007/s00572-015-0661-4

Hoeksema, J. D., Chaudhary, V. B., Gehring, C. A., Johnson, N. C., Karst, J., Koide, R. T., et al. (2010). A meta-analysis of context-dependency in plant response to inoculation with mycorrhizal fungi. *Ecology Letters*, *13*(3), 394–407. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01430.x

Iglesias, L., Salas, E., Leblanc, H. A., & Nygren, P. (2011). Response of *Theobroma cacao* and *Inga edulis* seedlings to cross-inoculated populations of arbuscular mycorrhizal fungi. *Agroforestry Systems*, *83*, 63–73. https://doi.org/10.1007/s10457-011-9400-9

Johnson, N. C. (1993). Can fertilization of soil select less mutualistic mycorrhizae? *Ecological Applications*, *3*(4), 749–757. https://doi.org/10.2307/1942106

Johnson, N. C., Graham, J. H., & Smith, F. A. (1997). Functioning of mycorrhizal associations along the mutualism–parasitism continuum. *New Phytologist*, *135*(4), 575–585. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00729.x

Karmakar, B., & Chakraborty, M. (2026). Plant-based dyes as eco-friendly alternative for visualization of arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Microbiological Methods*, *242*, 107416. https://doi.org/10.1016/j.mimet.2026.107416

Kouadio, A. N. M.-S., Nandjui, J., Krou, S. M., Séry, D. J.-M., Nelson, P., & Zézé, A. (2017). A native arbuscular mycorrhizal fungus inoculant outcompetes an exotic commercial species under two contrasting yam field conditions. *Rhizosphere*, *4*, 112–118. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2017.10.001

Koziol, L., McKenna, T. P., & Bever, J. D. (2025). Meta-analysis reveals globally sourced commercial mycorrhizal inoculants fall short. *New Phytologist*, *246*(3), 821–827. https://doi.org/10.1111/nph.20278

Loján, P., Senés-Guerrero, C., Suárez, J. P., Kromann, P., Schüßler, A., & Declerck, S. (2017). Potato field-inoculation in Ecuador with *Rhizophagus irregularis*: No impact on growth performance and associated arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Symbiosis*, *73*(1), 45–56. https://doi.org/10.1007/s13199-016-0471-2

Lucas, L. S., Ramos, M. L. G., Souza, R. F., Moura, J. B., & Vieira Junior, W. G. (2025). Mycorrhizae and soil pathogens in tropical regions. In Q. S. Wu (Ed.), *Management of mycorrhizal symbiosis for mycoremediation and phytostabilization* (pp. 261–272). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-24863-4.00015-7

Lumini, E., Vallino, M., Alguacil, M. M., Romani, M., & Bianciotto, V. (2011). Different farming and water regimes in Italian rice fields affect arbuscular mycorrhizal fungal soil communities. *Ecological Applications*, *21*(5), 1696–1707. https://doi.org/10.1890/10-1542.1

Marrassini, V., Ercoli, L., Kuramae, E. E., Kowalchuk, G. A., & Pellegrino, E. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi originated from soils with a fertility gradient highlight a strong intraspecies functional variability. *Applied Soil Ecology*, *197*, 105344. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105344

Marrassini, V., Ercoli, L., Cardelli, R., Cantini, V., & Pellegrino, E. (2026). 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*, *1012*, 181292. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.181292

Marro, N., Grilli, G., Soteras, F., Caccia, M., Longo, S., Cofré, N., et al. (2022). The effects of arbuscular mycorrhizal fungal species and taxonomic groups on stressed and unstressed plants: A global meta-analysis. *New Phytologist*, *235*, 320–332. https://doi.org/10.1111/nph.18102

Michel, J., Lehnert, M., Nebel, M., & Quandt, D. (2025). Low and facultative mycorrhization of ferns in a low-montane tropical rainforest in Ecuador. *PLoS ONE*, *20*(7), e0326712. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0326712

Moola, S., Munn, Z., Tufanaru, C., Aromataris, E., Sears, K., Sfetcu, R., et al. (2024). Systematic reviews of etiology and risk. In E. Aromataris, C. Lockwood, K. Porritt, B. Pilla, & Z. Jordan (Eds.), *JBI manual for evidence synthesis*. JBI.

Nagy, V., Sándor, R., Klem, K., & Urban, O. (2026). Functional limitations of glomalin-related soil protein as an indicator of arbuscular mycorrhizal fungi while remaining relevant to soil health. *Soil Biology and Biochemistry*, *214*, 110076. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.110076

Naranjo-Morán, J., Olivo-Fernández, K., Barcos-Arias, M., & Oviedo-Archundia, R. (2025). Choice of trap plant and substrate for mycorrhizal inoculum production. *La Granja*, *42*(2), 78–89. https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.05

Naranjo-Moran, J., Pincay-Orrala, Z., & Navarrete-Mite, T. (2026). Autotrophic *in vitro* culture method, inoculated with native arbuscular mycorrhizae, for the adaptation of trap plants of the Asteraceae family. *Scientia Agropecuaria*, *17*(1), 67–75. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2026.004

Nath, D., Kumari, V., & Durga, M. L. (2025). Optimizing plant growth and resilience under abiotic stresses through arbuscular mycorrhizal symbiosis. In H. I. Mohamed (Ed.), *Elicitors for sustainable crop production* (pp. 169–185). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-95-3533-0_7

Njaramanana, N. M. R., Rahetlah, V. B., Trap, J., & Autfray, P. (2022). Field arbuscular mycorrhizal inoculation increased plant performance without phosphorus fertilizer supply of four promoted upland rice varieties in Madagascar. *Experimental Agriculture*, *58*, e57. https://doi.org/10.1017/S0014479722000527

Pacheco Flores de Valgaz, A., Naranjo-Morán, J., Reyes Román, G., Oviedo-Anchundia, J., Ratti Torres, M., & Barcos-Arias, M. (2022). Discovering the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with two cultivation practices of *Theobroma cacao*. *Diversity*, *14*(8), 651. https://doi.org/10.3390/d14080651

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, *372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Presidencia de la República del Ecuador. (2011). *Decreto Ejecutivo 905: Reglamento nacional al régimen común sobre acceso a los recursos genéticos en aplicación a la Decisión 391 de la Comunidad Andina*. Registro Oficial Suplemento 553.

Presidencia de la República del Ecuador. (2019). *Decreto Ejecutivo 752: Reglamento al Código Orgánico del Ambiente*. Registro Oficial Suplemento 507.

Presidencia de la República del Ecuador. (2025). Decreto Ejecutivo 100.

Quilambo, O. A., Weissenhorn, I., Doddema, H., Kuiper, P. J. C., & Stulen, I. (2005). Arbuscular mycorrhizal inoculation of peanut in low-fertile tropical soil. II. Alleviation of drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, *28*(9), 1645–1662. https://doi.org/10.1080/01904160500203606

Rayo Sánchez, C. L., & Avellaneda-Torres, L. M. (2022). Efecto de la aplicación de hongos micorrízicos arbusculares sobre microorganismos del ciclo del nitrógeno en suelos cultivados con café. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, *23*(3), 2342. https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num3_art:2342

Sakha, M., Gweyi-Onyango, J. P., Kaushal, M., Baijukya, F. P., & Masso, C. (2025). Native arbuscular mycorrhizal fungal communities in trap cultures are shaped by traditional host plants and agricultural soils. *Journal of Fungi*, *11*(11), 792. https://doi.org/10.3390/jof11110792

Salomon, M. J., Watts-Williams, S. J., McLaughlin, M. J., Bücking, H., Singh, B. K., Hutter, I., et al. (2022). Establishing a quality management framework for commercial inoculants containing arbuscular mycorrhizal fungi. *iScience*, *25*(7), 104636. https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104636

Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica. (s. f.). *Access and Benefit-Sharing Clearing-House: Ecuador*.

SENESCYT & Ministerio del Ambiente. (2018). *Acuerdo Interministerial SENESCYT-MAE-2018-001: Lineamientos y directrices para la coordinación interinstitucional relativa a procesos administrativos relacionados con autorizaciones, permisos y contratos de acceso a recursos biológicos, genéticos y sus derivados, asociados o no a conocimientos tradicionales*.

Séry, D. J.-M., Kouadjo, Z. G. C., Voko, B. R. R., & Zézé, A. (2016). Selecting native arbuscular mycorrhizal fungi to promote cassava growth and increase yield under field conditions. *Frontiers in Microbiology*, *7*, 2063. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02063

Sisalima-Ortega, L., Ruilova, V., & Capa-Morocho, M. (2023). Efecto de inoculación micorrízica en la etapa productiva del cacao nacional (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonía ecuatoriana. *CEDAMAZ*, *13*(1), 17–24. https://doi.org/10.54753/cedamaz.v13i1.1742

Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis* (3rd ed.). Academic Press.

Sofi, M. N., Bhat, R. A., Rashid, A., Mir, N. A., Mir, S. A., & Lone, R. (2017). Rhizosphere mycorrhizae communities: An input for organic agriculture. In A. Varma, R. Prasad, & N. Tuteja (Eds.), *Mycorrhiza* (pp. 387–413). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68867-1_21

Stewart, J. D., Ramirez, D. X., León-Reyes, A., Barriga, N., Llerena, S., Manley, B. F., et al. (2026). Land use change reshapes climate-driven diversity patterns of tropical arbuscular mycorrhizal fungi. *Molecular Ecology*, *35*(2), e70253. https://doi.org/10.1111/mec.70253

Stürmer, S. L., Bever, J. D., Schultz, P. A., & Bentivenga, S. P. (2021). Celebrating INVAM: 35 years of the largest living culture collection of arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, *31*(1), 117–126. https://doi.org/10.1007/s00572-020-01008-z

Symanczik, S., Gisler, M., Thonar, C., Schlaeppi, K., Van der Heijden, M., Kahmen, A., et al. (2017). Application of mycorrhiza and soil from a permaculture system improved phosphorus acquisition in naranjilla. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 1263. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01263

Tchabi, A., Coyne, D., Hountondji, F., Lawouin, L., Wiemken, A., & Oehl, F. (2010). Efficacy of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi for promoting white yam (*Dioscorea rotundata*) growth in West Africa. *Applied Soil Ecology*, *45*(2), 92–100. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.03.001

Tedersoo, L., Bahram, M., & Zobel, M. (2020). How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. *Science*, *367*(6480), eaba1223. https://doi.org/10.1126/science.aba1223

Turrini, A., & Giovannetti, M. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi in national parks, nature reserves and protected areas worldwide: A strategic perspective for their *in situ* conservation. *Mycorrhiza*, *22*(2), 81–97. https://doi.org/10.1007/s00572-011-0419-6

Van Nuland, M. E., Averill, C., Stewart, J. D., Prylutskyi, O., Corrales, A., van Galen, L. G., et al. (2025). Global hotspots of mycorrhizal fungal richness are poorly protected. *Nature*, *645*(8080), 414–422. https://doi.org/10.1038/s41586-025-09277-4

Větrovský, T., Kolařík ová, Z., Lepinay, C., Awokunle Hollá, S., Davison, J., Fleyberková, A., et al. (2023). GlobalAMFungi: A global database of arbuscular mycorrhizal fungal occurrences from high-throughput sequencing metabarcoding studies. *New Phytologist*, *240*(5), 2151–2163. https://doi.org/10.1111/nph.19283

Viera, W., Campaña, D., Lastra, A., Vásquez, W., Viteri, P., & Sotomayor, A. (2017). Micorrizas nativas y su efecto en dos portainjertos de tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav.). *Bioagro*, *29*(2), 105–114.

Vivanco Galván, O., Sánchez-Rodríguez, A., & Suárez, J. P. (2020). Wild *Solanum cajanumensis* species as a potential reservoir of arbuscular mycorrhizal fungi diversity compatible with cultivated *Solanum betaceum* species. *Agriculture and Natural Resources*, *54*(5), 567–574. https://doi.org/10.34044/j.anres.2020.54.5.15

Wu, Y., Chen, C., & Wang, G. (2024). Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi improves plant biomass and nitrogen and phosphorus nutrients: A meta-analysis. *BMC Plant Biology*, *24*, 960. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05638-9

Xia, G., Zhu, S., Zhao, W., Yang, X., Sheng, L., & Mao, H. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi alter rhizosphere fungal community characteristics of *Acorus calamus* to improve Cr resistance. *PeerJ*, *11*, e15681. https://doi.org/10.7717/peerj.15681

Xu, Y., Chen, Z., Li, X., Tan, J., Liu, F., & Wu, J. (2023). The mechanism of promoting rhizosphere nutrient turnover for arbuscular mycorrhizal fungi attributes to recruited functional bacterial assembly. *Molecular Ecology*, *32*(9), 2335–2350. https://doi.org/10.1111/mec.16880

Yang, X., Yuan, M., Guo, J., Shi, L., & Zhang, T. (2021). Suppression of arbuscular mycorrhizal fungi aggravates the negative interactive effects of warming and nitrogen addition on soil bacterial and fungal diversity and community composition. *Applied and Environmental Microbiology*, *87*(22), e01523-21. https://doi.org/10.1128/AEM.01523-21

Yonas, M. W., & Zawar, S. (2024). Optimizing chickpea growth: Unveiling the interplay of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium for sustainable agriculture. *Soil Use and Management*, *40*(2), e13057. https://doi.org/10.1111/sum.13057

Yue, J., He, Y., Ma, W., Zhao, C., Liu, Y., Zhang, L., et al. (2026). Arbuscular mycorrhizal fungi mitigate microplastic-induced shifts in soil nematode communities. *Applied Soil Ecology*, *219*, 106765. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106765

Zhang, E., Wang, Y., Chen, S., Zhou, D., Shangguan, Z., Huang, J., et al. (2024). Mycorrhizal symbiosis increases plant phylogenetic diversity and regulates community assembly in grasslands. *Ecology Letters*, *27*(9), e14516. https://doi.org/10.1111/ele.14516