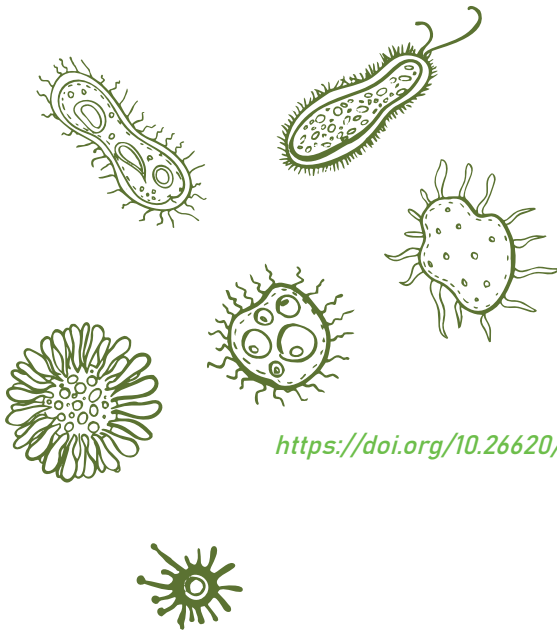


CAPITULO 5

Microorganismos en los sistemas de producción agrícola y agroforestales. Una apuesta hacia la sostenibilidad



Johan Steven Alcántara Cortes¹
Nubia Carolina Higuera Mora¹
Raúl Hernando Posada Almanza^{1,2}

<https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap5>

Cómo citar este capítulo

Alcántara Cortes, J. S., Higuera Mora, N. C., & Posada Almanza, R. H. (2025). Microorganismos en los sistemas de producción agrícola y agroforestales: Una apuesta hacia la sostenibilidad. En N. C. Higuera Mora & R. H. Posada Almanza (Eds.), *Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales* (pp. 167–186). Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. <https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap5>

1 Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. Programa de Ingeniería Agroecológica. Rectoría Bogotá. Grupo de Investigación Agroeco y Gestión ambiental.

2 Zenkinoko S.A.S

Introducción

El microbioma edáfico es un componente esencial en la dinámica de los agroecosistemas, desempeñando roles fundamentales en la fertilidad del suelo, la sanidad vegetal y la productividad agrícola (Dubey et al. 2019). La importancia del microbioma y su diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales reside en las funciones esenciales que sustenta, como la solubilización de nutrientes, descontaminación, desalinización, estabilización de la estructura, fijación biológica de nitrógeno, transporte y absorción de nutrientes, y control biológico de patógenos, entre otros, generando beneficios ecosistémicos y agronómicos fundamentales (Hermans et al. 2023; Shah et al. 2022). La biotecnología en reconocimiento de este potencial ha impulsado el aprovechamiento de la diversidad microbiana, como una alternativa innovadora a las prácticas de manejo agrícolas convencionales, consolidándose como un campo de estudio prometedor y necesario para abordar desafíos actuales como la degradación del suelo, el cambio climático y las enfermedades en sistemas agrícolas, contribuyendo a la sostenibilidad, resiliencia y eficiencia de los sistemas agrícolas y agroforestales (Bakker & Berendsen, 2022; Jansson et al. 2023).

Los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPMs por sus siglas en inglés) tienen diversos mecanismos de acción tales como la solubilización de fosfatos, fijación de nitrógeno y degradación de la materia orgánica, lo que contribuye a la liberación de micronutrientes y una mejora en la nutrición de las plantas (Taheri et al. 2025). Gracias a estas capacidades, estos microorganismos pueden utilizarse para suplir o complementar los procesos de fertilización química tradicional que generan a largo plazo un deterioro en la calidad del suelo, por lo que constituyen una herramienta clave para estimular el crecimiento vegetal; actuando a través de mecanismos directos, como la liberación de hormonas y enzimas, e indirectos, como la resistencia a estrés abiótico y el control biológico de patógenos (De Souza et al. 2015; Hanif et al. 2024).

Por su parte, los Hongos de Micorriza Arbuscular (HMA) destacan por su eficiencia en la adquisición y transporte de múltiples nutrientes escasos en la rizosfera, especialmente fósforo, y permitir una alta adaptabilidad a condiciones de estrés como suelos salinos (Taheri et al. 2025). Su presencia es vital en la comunidad microbiana del suelo, ya que son un componente clave para garantizar la nutrición vegetal.

Por otro lado, el desarrollo de la actividad microbiana y la biomasa edáfica son considerados como factores clave al momento de evaluar características como la calidad y la salud del suelo, ya que pueden condicionar factores como la regulación de los ciclos biogeoquímicos (mineralización del fósforo, fijación y transformación de carbono y nitrógeno) y la promoción del crecimiento vegetal a nivel de la rizosfera, que pueden ser cruciales para el aumento de la productividad y la reducción de la fertilización química tradicional (Volpiano et al. 2022).

Sin embargo, la presencia, diversidad y funcionalidad de los microorganismos en los sistemas agrícolas y agroforestales dependen de diversos factores como el clima, la topografía, el tipo y diversidad vegetal, las prácticas de manejo como la labranza, la adición de enmiendas, y el uso de fertilizantes y pesticidas (Beule et al. 2022; Camelo et al. 2021; Nahon et al. 2024). La compleja interacción de estos factores determina la composición, abundancia y actividad del microbioma edáfico y, por ende la salud y productividad de los sistemas agrícolas y agroforestales. Por ejemplo, en los sistemas agroforestales (SAF), conocidos sistemas de producción integrado entre cultivos y especies forestales, hay condiciones microclimáticas favorables y una mayor cantidad de materia orgánica, que crean nichos diversos para los microorganismos, promoviendo un suelo más saludable y biodiverso (Camelo et al. 2021; Nahon et al. 2024).

A pesar del amplio reconocimiento de la importancia y rol de los microorganismos, el uso intensivo de prácticas agrícola, la expansión de los monocultivos y el uso indiscriminado de fertilizantes y pesticidas representan una amenaza para la salud del suelo y disminuyen la acción benéfica de la microbiota edáfica (Belete & Yadete, 2023; Vahter et al. 2022). Esta situación reduce el potencial del suelo como una valiosa fuente de recursos genéticos, limitando la posibilidad de recuperar aquellos microorganismos con un alto potencial biotecnológico, aunado a su posible uso como indicadores de calidad del suelo (Belete & Yadete, 2023; Thiele-Bruhn et al. 2012; Vahter et al. 2022). Por lo tanto, aunque en la actualidad no se conozcan todos los usos específicos de la biodiversidad asociada a los sistemas agrícolas, su conservación es crucial ante la posibilidad de futuros descubrimientos y aplicaciones.

En este contexto, el presente capítulo de cierre expone una síntesis funcional de los hallazgos obtenidos a través de cuatro estudios de caso centrados en los cultivos de cacao (*Theobroma cacao*), cebolla (*Allium cepa*),

aguacate (*Persea americana*) y *Gmelina arborea*, explorando su perspectiva microbiológica en la sostenibilidad. A lo largo del libro, se ha destacado la relevancia de implementar estrategias basadas en la diversidad microbiana para mejorar la salud del suelo, la calidad edáfica y la productividad. Los estudios presentados subrayan el potencial de estas prácticas para construir modelos predictivos y promover sistemas agrícolas más resilientes a largo plazo. Adicionalmente, no solo recoge estos hallazgos, sino que también señala las futuras direcciones de investigación destacando la importancia de considerar la diversidad microbiana en la agricultura sostenible mediante el desarrollo de bioinsumos.

En el primer capítulo se abordó el uso de las poblaciones microbianas como un indicador de calidad del suelo y su asociación con patrones de diversidad vegetal y analitos fisicoquímicos edáficos, encontrando que la diversidad vegetal puede estar asociada a los diferentes grupos funcionales cultivables; estos a su vez, podrían relacionarse con algunas condiciones fisicoquímicas que podrían interpretarse como indicadores de la salud edáfica para los cultivos de cacao. Las bacterias fijadoras de nitrógeno fueron particularmente relevantes en los sistemas agroforestales de cacao, donde su presencia fue más destacada en contextos de alta biodiversidad. Estos microorganismos son capaces de incorporar nitrógeno atmosférico al suelo en formas asimilables para las plantas, promoviendo la fertilidad y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas sin depender de fertilizantes nitrogenados sintéticos (Kuypers et al. 2018; Xu & Wang, 2023). Además, los sistemas con alta biodiversidad arbórea presentaron una mayor abundancia de bacterias solubilizadoras, lo cual se asocia con una mejora en la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y carbono orgánico (Alori et al. 2017; Moreno et al. 2018).

Del segundo capítulo se resalta el uso de los HMA como indicadores de calidad de suelos gracias a la interacción de estas poblaciones con parámetros fisicoquímicos edáficos. Aquí se pudo observar que existieron grupos de HMA conservados entre las fincas que, por las condiciones a las que se ven expuestas, podrían generar mayores umbrales de resistencia, colonizar ambientes de alta intensidad agrícola y promover el crecimiento vegetal de forma específica, generando un reservorio ecológico de microorganismos que podrían utilizarse a futuro como bioinoculantes en suelos degradados. Los HMA mejoran la absorción de fósforo, estabilizan la estructura del suelo y aumentan la resiliencia del cultivo frente a factores bióticos y abióticos

(Piliarová et al. 2019). En esta sección se encontró que la salud del suelo influye más en la composición de especies de HMA que en su riqueza, y que estos hongos pueden persistir incluso en condiciones edáficas adversas, proporcionando una herramienta clave en la restauración funcional del suelo.

En cuanto al tercer capítulo, se proporcionó una perspectiva biotecnológica del procedimiento de bioprospección encaminado hacia la búsqueda de microorganismos nativos, encontrados en cultivos de aguacate, que pueden ejercer un efecto bicontrolador frente a patógenos asociados al cultivo, además la estrategia propuso una interesante metodología para recolectar e identificar microorganismos asociados a diferentes nichos vegetales, que podrían adaptarse de una manera más adecuada durante su aplicación en campo, además de describir el procedimiento de escalamiento y formulación basado en productos microbianos con aplicación directa o indirecta. Los ensayos de antagonismo *in vitro* y en condiciones reales de cultivo demostraron la viabilidad técnica de prototipos de bioinsumos formulados a partir de estas cepas. Asimismo, las investigaciones resaltaron el potencial de estos bioproductos para ser incorporados en estrategias de manejo integrado de cultivos, disminuyendo el uso de agroquímicos sintéticos.

Por último, el cuarto capítulo describió el uso de *G. arborea* como un modelo que puede utilizarse para llevar a cabo la selección y evaluación de microorganismos con potencial bioinoculante a nivel de laboratorio, vivero y campo, generando una metodología para analizar la interacción de esta planta con microorganismos solubilizadores de fosfato y gramíneas como *B. pertusa*, para la promoción de sistemas agroforestales con enfoque sostenible y agroecológico. Aquí se obtuvo como resultado una interacción positiva entre los árboles y especies herbáceas en arreglos agroforestales, mediada por el incremento de la actividad microbiana a nivel de la rizosfera. Adicionalmente, se obtuvo como resultado la posibilidad de generar un reemplazo de hasta el 75% de la fertilización química sin afectar los indicadores de desarrollo vegetal, demostrando la capacidad del modelo para la evaluación de inoculantes microbianos con potencial biofertilizador.

A continuación, se plantean algunas temáticas que pueden plantearse a partir de la lectura y análisis de los cuatro capítulos de investigación, sustentados desde los hallazgos planteados en este libro.

Relación entre la biodiversidad y funciones microbianas en los sistemas de producción agrícola y agroforestales

Si bien el libro abordó diferentes casos de estudio, centrarse en las funciones microbianas como eje articulador permite reafirmar que, aunque los agroecosistemas son ecosistemas modificados para la agricultura, y su establecimiento genera dinámicas coevolutivas que alteran la microbiota original, favoreciendo comunidades específicas a cada sistema productivo, los agroecosistemas también pueden ser un reservorio de biodiversidad. El libro documenta la presencia de microorganismos con diferentes funciones en los sistemas de producción de cacao (*Theobroma cacao*), cebolla (*Allium cepa*), aguacate (*Persea americana*) y *Gmelina arborea*, confirmando su potencial para contribuir significativamente a mejorar la disponibilidad de nutrientes, control biológico y recuperación de suelos degradados. Además, estos microorganismos no solo contribuyen a la fertilidad del suelo, sino que también modifican las propiedades físicas y químicas de este, promoviendo un entorno más favorable para el crecimiento vegetal (Hartmann & Six, 2023; Mooney et al. 2024).

La rizosfera del aguacate, por ejemplo, como nicho ecológico altamente dinámico, constituye una fuente valiosa de agentes de control biológico (ACB), dada su riqueza microbiana y la presencia de cepas que establecen relaciones simbióticas o antagonistas con fitopatógenos. Muchos de estos microorganismos son capaces de producir compuestos bioactivos (antibióticos, sideróforos, enzimas líticas, etc.) que inhiben directa o indirectamente el crecimiento de patógenos (Hasan et al. 2024). Este enfoque no solo representa una alternativa sustentable frente al uso de fungicidas sintéticos, sino que también promueve el desarrollo de bioproductos que podrían incluirse en programas de manejo integrado del cultivo, para ser utilizados en procesos de bioestimulación y restauración de suelos.

Por su parte, *Gmelina arborea*, ampliamente reconocida por su valor como especie leñosa en plantaciones comerciales, sistemas agroforestales y procesos de restauración ecológica, en el contexto de este libro, se destaca por su importancia como una fuente de microorganismos con capacidad para solubilizar fosfatos en el suelo. Además, se plantea su uso como modelo experimental para evaluar el efecto de dichos microorganismos en condiciones de laboratorio, vivero y campo, así como para estudiar su interacción con otras especies vegetales, particularmente pasturas del género *Bothriochloa pertusa*.

Por otro lado, los cultivos de cebolla y cacao mostraron una presencia significativa de microorganismos como HMA y bacterias mesófilas aerobias, solubilizadoras de fósforo, fijadoras de nitrógeno, hongos y actinobacterias. Su asociación con diferentes condiciones fisicoquímicas de suelo, diversidad y manejo de los cultivos permitió analizar posibles acciones dirigidas a la conservación de estos microorganismos y sus funciones en los agroecosistemas.

Microorganismos edáficos y su asociación con el manejo de los agroecosistemas

Es fundamental reconocer que los microorganismos del suelo influyen directa e indirectamente en la salud del suelo, de las plantas, los animales y los seres humanos. Estos organismos cumplen un rol fundamental en el ciclo de los nutrientes, participando en procesos clave como la fijación biológica del nitrógeno y la solubilización de fosfatos, siendo la rizosfera un entorno determinante para la absorción de nutrientes, estimulando el crecimiento vegetal y fortaleciendo las defensas naturales de las plantas (Pantigoso et al. 2022). El suelo, como reservorio natural de diversidad microbiana, debe conservar su salud para que estos beneficios se manifiesten y perduren; sin embargo, la expresión de este potencial depende en gran medida del tipo de manejo que se implemente en los cultivos (Beule et al. 2022).

Modelos productivos como el cacao (*Theobroma cacao* L) con un total de 259.609 hectáreas cultivadas (Fedecacao, 2025; UPRA, 2024), puede desarrollarse en sistemas agroforestales, los cuales suelen integrarse con otras especies vegetales que proporcionan beneficios como sombra, reduciendo el estrés del cultivo y preservando la biodiversidad vegetal (Suárez et al. 2021). Estos sistemas favorecen procesos ecológicos clave como el secuestro de carbono, la mejora de la fertilidad del suelo y el control biológico de plagas (Suárez et al. 2021). Por ello, los productos provenientes de prácticas agrícolas orgánicas y enfoques agroecológicos presentan una alta demanda tanto a nivel nacional como internacional.

Mediante la caracterización de cultivos de cacao en la región de Pauna, Boyacá, asociadas a sistemas agroforestales de alta y baja diversidad arbórea, no se observaron diferencias marcadas en los parámetros fisicoquímicos generales del suelo. No obstante, ciertos elementos como hierro, manganeso y nitrógeno nítrico fueron mayores en cultivos asociados a alta biodiversidad

arbórea, mientras que CIC, azufre, boro, potasio y calcio fueron superiores en baja biodiversidad. Esto indica que, a pesar de las diferencias en la composición y estructura arbórea, ambos tipos de sistemas comparten condiciones fisicoquímicas comparables, representativas de la zona de estudio. Por otro lado, como resultados de la exploración de poblaciones microbianas cultivables asociadas a nivel de la rizosfera, se encontró mayor abundancia de microorganismos en los cultivos con mayor diversidad arbórea, con excepción de actinobacterias. Estos resultados sugieren que la biodiversidad vegetal puede estar relacionada positivamente con la actividad microbiana rizosférica y que características fisicoquímicas similares entre estos tipos de manejo, está asociado a que ambas clases de sistemas recibieron los beneficios de los sistemas agroforestales, independiente de su biodiversidad.

Estos resultados sugieren que parámetros como la diversidad vegetal y microbiológica influyen en los componentes bióticos del sistema. Esta influencia se traduce en beneficios para el cultivo, especialmente por el papel funcional de ciertos grupos microbianos, como las bacterias fijadoras de nitrógeno y las solubilizadoras de fósforo, que contribuyen a la provisión de nutrientes esenciales como el nitrógeno (N) y el fósforo (P) para la planta. A partir de este estudio, se logró establecer una relación entre factores bióticos y abióticos que inciden en el comportamiento y la distribución de las poblaciones microbianas. Comprender cómo estas poblaciones interactúan con los componentes biológicos y fisicoquímicos del suelo resulta clave para elucidar los mecanismos que sostienen la funcionalidad del agroecosistema cacaotero. Por lo tanto, el cultivo de cacao bajo estos sistemas biodiversos no solo respalda prácticas agrícolas más resilientes y ecológicas, sino que también se convierte en un modelo clave para la transición hacia la sostenibilidad.

Además del tipo de sistemas de producción agrícola diseñados, las prácticas de cultivo tienen una incidencia directa en las poblaciones microbianas del suelo. Los resultados de estudio en cebolla (*Allium cepa*), permitieron el avance del conocimiento en este sentido. El cultivo de cebolla en Colombia, altamente influenciada por el uso de enmiendas químicas durante todas las etapas fenológicas del cultivo, desde la siembra hasta la cosecha, que sumado a una alta presión por plagas y enfermedades (Galeano Mendoza et al. 2018), sugiere un posible deterioro progresivo del suelo, lo que podría derivar en una reducción de los rendimientos y en la degradación de los ecosistemas agrícolas.

El capítulo No. 2 del libro, que muestra los resultados de la evaluación de la riqueza y composición de HMA en 15 cultivos de cebolla de bulbo en Boyacá - Colombia con diferente grado de deterioro edáfico, analizando parámetros fisicoquímicos del suelo. Se encontró variabilidad entre las 23 morfoespecies de HMA y parámetros edáficos entre las diferentes fincas, oscilando entre 11 a 20 morfoespecies por finca. Se encontró exceso de algunos nutrientes y déficit de otros, con mediana a buena Capacidad de Intercambio Catiónico y un pH poco uniforme. Como producto de la variabilidad en salud del suelo donde se produce la cebolla de bulbo, las comunidades de HMA esporulan de manera diferencial, algunas especies como *Acaulospora* sp., *Acaulospora mellea*, *Funneliformis coronatum* y *Glomus trufemii* son constantes en su aparición, lo que muestra una gran resistencia de estas especies a diferentes condiciones edáficas, mientras otras como *Gigasporas* sp. *Glomus ambisporum*, *Rhizoglomus irregulare*, *Glomus microcarpum*, responden y esporulan como respuesta ante uno o varios parámetros edáficos como el pH, contenidos y proporciones iónicas (Ca^+ , K^+ , Mg^+), y/o bajos contenidos de carbono orgánico y nitrógeno.

Los hongos de micorriza arbuscular (HMA) se han perfilado como una alternativa para mejorar la salud del suelo, la calidad del bulbo y la productividad (Chaudhary et al. 2025; Rozpadek et al. 2016). Dentro de los resultados destacados, la salud del suelo, evaluada mediante diferentes parámetros fisicoquímicos en cultivos de cebolla de bulbo, mostró que se relaciona más con la composición que con la riqueza de especies de HMA en cultivos con actividad agrícola intensiva. Este hallazgo sugiere que los HMA son capaces de adaptarse a diferentes condiciones ambientales, demostrando una versatilidad que les permite proporcionar servicios ecosistémicos esenciales, incluso en suelos estresados. Adicionalmente, el manejo intensivo del cultivo de cebolla puede generar presión selectiva sobre las comunidades de HMA, favoreciendo la aparición de cepas con mayor tolerancia a fungicidas y otras condiciones adversas. Esta capacidad de adaptación sugiere que algunos HMA podrían desarrollar mecanismos que les permitan persistir en condiciones propias del manejo tradicional intensivo.

Control biológico, una función microbiana que se plantea desde una perspectiva biotecnológica

Los microorganismos tienen un alto potencial como controladores biológicos (Bonaterra et al. 2022; Garcia et al. 2016). Esta función microbiana fue

ampliamente documentada en el capítulo de investigación en aguacate. El aguacate en Colombia enfrenta desafíos significativos derivados de la intensificación de enfermedades fitopatógenas y el uso excesivo de fertilización química, factores que comprometen tanto la sostenibilidad del sistema agrícola como el cumplimiento de exigencias fitosanitarias impuestas por los mercados internacionales (García et al. 2021).

Dentro de los patógenos asociados al cultivo de aguacate se destaca *Phytophthora cinnamomi*, como un agente responsable de pérdidas económicas que se ha aislado extraído de varias regiones productoras en Colombia y que ha ocasionado efectos negativos durante la etapa de postcosecha, afectando la calidad de los frutos (Marulanda Medina, 2018). Para llevar a cabo la búsqueda de microorganismos con potencial para el control biológico se realizó la colecta de microorganismos de diferentes sitios plata-específicos (raíces, hojas, flores y frutos) de 240 plantas de aguacate aparentemente sanas, en tres regiones del departamento de Antioquia. De igual manera, plantas sintomáticas y asintomáticas fueron utilizadas para la recolección de fitopatógenos que fueron expuestos a interacción con los microorganismos potencialmente biocontroladores en ensayos *in vitro*. En este estudio, se lograron aislar 667 microorganismos (bacterias y hongos) de diferentes partes de la planta de aguacate y el suelo rizosférico, incluyendo patógenos y microorganismos con potencial benéfico (biocontroladores, biofertilizantes, bioestimulantes). Se desarrollaron bioformulaciones líquidas a partir de *Bacillus velezensis* HOB008-290 y extractos metabólicos de *Serratia marcescens* ARP5.1. La bioformulación de *B. velezensis* resultó en una emulsión homogénea y estable por hasta seis meses, con altas concentraciones celulares y de endosporas, y mostró una actividad antagonista del 90-100% contra *Colletotrichum gloeosporioides* (agente causal de la antracnosis) en condiciones *in vitro*. El extracto de *S. marcescens* también demostró actividad antagonista *in vitro*.

La búsqueda de alternativas sostenibles para el manejo fitosanitario de los cultivos agrícolas es un desafío creciente, impulsado por la necesidad de reducir el uso de agroquímicos y minimizar su impacto ambiental y en la salud humana (Mamani De Marchese, A., & Filippone, 2018). En este contexto, el desarrollo de bioinsumos basados en microorganismos benéficos ha cobrado gran relevancia, posicionándose como una estrategia clave dentro de los sistemas de producción agrícola. Sin embargo, la transición hacia el uso de estos productos requiere un enfoque integral que combine investigación,

innovación y articulación con el sector productivo (Mamani De Marchese, A., & Filippone, 2018).

Producción de bioinoculantes, una apuesta para el uso sostenible de la biodiversidad

El desarrollo de bioinsumos con aplicabilidad en campo requiere un proceso de investigación exhaustivo, que permita demostrar su eficacia tanto en condiciones de laboratorio como en ambientes reales de cultivo. El proceso de desarrollo de un bioinsumo eficaz no es inmediato ni sencillo, sin embargo, los capítulos de investigación en aguacate y *Gmelina* muestran como a través de una investigación rigurosa se pueden obtener productos consolidados que ofrecen alternativas biológicas a desafíos reales. Durante el desarrollo de los capítulos, se pudieron identificar las diferentes etapas para la obtención de un producto biológico, un proceso que inicia con la bioprospección de microorganismos con potencial biocontrolador o bioestimulante, seguida de su caracterización, formulación y evaluación en diferentes escalas, desde laboratorio hasta condiciones de vivero, campo e incluso postcosecha.

Factores como las condiciones de aplicación, la compatibilidad con otros insumos agrícolas y la estabilidad del producto pueden influir significativamente en su desempeño, lo que hace indispensable optimizar los protocolos de uso. En este sentido, el diseño racional de bioinsumos debe contemplar etapas fundamentales como la bioprospección microbiana, la formulación basada en parámetros adecuados, y la validación tanto *in vitro* como *in situ*. Asimismo, es prioritario garantizar la seguridad de estos productos mediante estudios toxicológicos y de mutagenicidad (Sáenz et al. 2013). Estas estrategias representan una alternativa ecológica viable para reducir la dependencia de agroquímicos, minimizar el deterioro del suelo, mejorar la productividad agrícola y mitigar la aparición de resistencia en fitopatógenos.

En el estudio de aguacate, las cepas con mayor potencial biocontrolador fueron optimizadas para su producción a escala de erlenmeyer y biorreactor de 14 litros. Dentro de los aislamientos encontrados se destacaron las cepas de *B. velezensis* HOB008-290 y *S. marcescens* ARP5.1 por su alto potencial biocontrolador contra *Colletotrichum* sp., *P. cinnamomi* y *Phomopsis* sp. El primero fue utilizado para optimizar la producción de biomasa y la esporulación; mientras que el segundo, dado su posible rol patógeno en

humanos, fue optimizado para la producción de extractos extracelulares. Las formulaciones obtenidas fueron sometidas a pruebas de citotoxicidad, genotoxicidad y mutagenicidad, con el propósito de validar su seguridad biológica antes de su aplicación en ensayos de eficacia en campo bajo condiciones reales de cultivo y durante la etapa de postcosecha. En el estudio, el prototipo de formulado a base de *B. velezensis* HOB008-290 demostró un alto potencial como estrategia biológica preventiva contra la antracnosis en aguacate Hass durante la postcosecha, con resultados variables entre fincas debido a factores ambientales y de manejo agronómico.

Por otro lado, los resultados mostrados con el modelo experimental de *Gmelina arborea*, profundizaron en los estudios que se deben realizar para validar los resultados de laboratorio en una mayor escala, permitiendo corroborar la eficacia de los productos en condiciones reales. Para las pruebas en etapa de vivero se prepararon cuatro tratamientos para comparar diferentes concentraciones de urea sobre la actividad de un inoculante constituido por *Paenibacillus taichungensis* y *Pseudomonas* sp. durante la germinación (% de emergencia) y el desarrollo de *G. arborea* (día 60 al 123). Finalmente, durante la etapa de campo se sembraron 200 plantas de 30 cm de altura de *G. arborea* inoculadas con el consorcio microbiano, sobre una pastura de *Bohtriochloa pertusa* sin fertilización. Durante esta última etapa se realizaron mediciones de crecimiento con una cinta métrica, se contaron las hojas, se evaluaron parámetros fisiológicos como Radiación Fotosintéticamente Activa (RAFA). Además, se hicieron mediciones de indicadores físicos del suelo a tres distancias del tronco de *G. arborea* (10; 50; 100 y 150 cm) donde se evaluó resistencia a la penetración, densidad aparente y el porcentaje de humedad del suelo.

Asimismo, en los resultados obtenidos en los ensayos de vivero se destacó el uso del consorcio *Paenibacillus taichungensis* y *Pseudomonas orientalis*, principalmente por la capacidad que posee para reducir hasta en un 50% el uso de urea como fertilizante tradicional y de generar un mayor porcentaje de germinación hasta los 35 días de cultivo. Además, se resalta con mayor eficacia, el valor que presentaron estos bioinsumos al comparar variables como el peso seco y la altura hacia el final de los 120 días de cultivo, donde tratamientos con inóculo bacteriano alcanzaron niveles ligeramente más altos en comparación con el testigo. Esto indicaría que los bioinsumos seleccionados podrían ser utilizados para reducir el uso de agroquímicos como la urea, dado el papel que juegan para promover el crecimiento vegetal por mecanismos

como la fijación biológica de nitrógeno, además, si se usan en conjunto con fertilizantes químicos, pueden aumentar las características agronómicas a lo largo de todo el cultivo.

En cuanto a los ensayos de campo, se demostró que *G. arborea* es una especie robusta y adaptable, capaz de competir efectivamente con cultivos herbáceos como *Bohtriochloa pertusa*. A pesar de las disminuciones en la biomasa de la gramínea debido a la reducción de la radiación fotosintéticamente activa (RAFA) bajo su dosel, las plantas leñosas compensaron esta pérdida mediante la producción de biomasa foliar, lo que refleja su capacidad para contribuir a la nutrición animal en sistemas silvopastoriles. Además, los datos recuperados sobre el suelo y la actividad microbiana revelaron que *G. arborea* fomenta un ambiente más favorable para las comunidades microbianas en la rizosfera, mejorando las propiedades físicas del suelo.

A pesar de los avances alcanzados, aún existen desafíos en la adopción de bioinsumos a gran escala. La regulación de estos productos sigue evolucionando y, en muchos casos, las barreras normativas y la falta de conocimiento técnico dificultan su masificación. Además, su eficacia puede verse influenciada por múltiples factores, como las condiciones agroecológicas, la interacción con otros insumos agrícolas y la variabilidad de los sistemas productivos. Superar estos retos requiere continuar con investigaciones que permitan mejorar la estabilidad, compatibilidad y la eficiencia de los bioinsumos, así como fortalecer su aceptación entre productores y consumidores.

Consideraciones finales

Los microorganismos aportan una valiosa fuente de recursos genéticos y servicios ecosistémicos que pueden ser integrados de formas como las abordadas en este libro, para mejorar los sistemas de producción agrícola y agroforestales, además brindan la posibilidad de generar estrategias que a largo plazo podrían utilizarse para mitigar los impactos de fenómenos como el cambio climático, la erosión de suelos y el aumento de las enfermedades, con la finalidad de afrontar estos retos desde los recursos genéticos encontrados en ecosistemas colombianos. Los resultados obtenidos no solo amplían el conocimiento sobre las interacciones ecosistémicas, sino que también ofrecen herramientas prácticas para promover la construcción de cultivos sanos y sostenibles.

La diversidad microbiana desempeña un papel crítico en la salud y productividad de los suelos. Parte de la investigación tratada en este libro ha demostrado que la conservación de la biodiversidad vegetal en cultivos promueve comunidades microbianas más beneficiosas, mejorando las condiciones nutricionales del suelo. Asimismo, en sistemas de cultivo en donde la asociación entre microorganismos y suelo es compleja y específica según la especie, la mejora del microhábitat sigue demostrando el potencial de los microorganismos para la restauración del suelo y la mejora de su salud.

Las interacciones entre suelo, microorganismos y plantas son fundamentales para el funcionamiento de los ecosistemas agropecuarios. Los microorganismos, como los micorrízicos, biofertilizantes (fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fosfatos) y biocontroladores, desempeñan roles esenciales en la mejora de la fertilidad del suelo, el control biológico de patógenos y la promoción del crecimiento vegetal. Estas funciones microbianas no solo reducen el uso de insumos químicos, sino que también contribuyen a la regeneración del suelo y al aumento de la resiliencia ambiental.

Por otra parte, el desarrollo de bioinsumos basados en microorganismos representa un avance significativo hacia la agricultura del futuro, donde el uso de tecnologías biológicas contribuirá a reducir el impacto ambiental y mejorar la seguridad alimentaria. Este libro actúa como un recurso valioso para investigadores, estudiantes y profesionales interesados en biotecnología agrícola, microbiología edáfica y manejo agroforestal, ofreciendo una visión integrada de los desafíos y oportunidades en el ámbito de la sostenibilidad agrícola. Adicionalmente, aborda de manera exhaustiva la importancia de implementar el uso de la diversidad microbiana como una herramienta clave para mejorar la salud del suelo, la productividad agrícola y la sostenibilidad en diferentes sistemas agroforestales, proponiendo a los microorganismos como indicadores clave de la salud y sanidad del suelo.

La agricultura se enfrenta a desafíos importantes relacionados con la sostenibilidad, la seguridad alimentaria y el impacto ambiental. En este contexto, el desarrollo de bioinsumos basados en microorganismos surge como una solución innovadora que contribuye a reducir la dependencia de productos químicos y a promover prácticas agrícolas más respetuosas con el medio ambiente.

Estos productos biológicos no solo reducen el impacto ambiental asociado al uso de agroquímicos, sino que también promueven la sostenibilidad y la

resiliencia de los sistemas agrícolas. El impulso de estas tecnologías biológicas requiere un trabajo colaborativo entre la comunidad científica y el sector agrícola. La selección de indicadores microbiológicos con potencial beneficioso para la agricultura debe estar acompañada de estrategias de divulgación y capacitación que faciliten su adopción. Estas acciones son esenciales para garantizar que los avances en biotecnología sean accesibles y efectivos para los productores.

Para consolidar estos avances, es fundamental desarrollar bioinsumos adaptados a condiciones locales y fomentar investigación transdisciplinar que integre microbiología, ecología funcional y manejo agronómico participativo. La promoción de prácticas como la agroforestería, que favorecen la biodiversidad microbiana, es clave para aprovechar los beneficios ecosistémicos y avanzar hacia una agricultura más sostenible y productiva.

Los estudios presentados en este libro subrayan la importancia de integrar el conocimiento sobre la microbiología del suelo en prácticas agrícolas sostenibles. La biodiversidad microbiana no solo es un indicador clave de la salud del suelo, sino que también ofrece herramientas innovadoras para mejorar la productividad y reducir el impacto ambiental. De esta manera, los avances presentados demuestran el valor de la investigación en la construcción de soluciones biotecnológicas aplicadas al agro. La bioprospección y el desarrollo de bioinsumos representan una oportunidad para mejorar la productividad y competitividad de la agricultura, reduciendo su dependencia de productos químicos, aprovechando el uso de los servicios ecosistémicos que cumplen dentro de estos sistemas y promoviendo la conservación de la biodiversidad del suelo. El reto hacia el futuro es consolidar estrategias que permitan que estos desarrollos trasciendan el ámbito experimental y se conviertan en herramientas accesibles y efectivas para el sector agrícola, asegurando así una producción más sostenible y alineada con las demandas del mercado global.

Referencias

- Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
- Bakker, P. A. H. M., & Berendsen, R. L. (2022). The soil-borne ultimatum, microbial biotechnology and sustainable agriculture. *Microbial*

Biotechnology, 15(1), pp. 84–87). <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13947>

- Belete, T., & Yadete, E. (2023). Effect of mono cropping on soil health and fertility management for sustainable agriculture practices: A Review. *Journal of Plant Sciences*. <https://doi.org/10.11648/j.jps.20231106.13>
- Beule, L., Vaupel, A., & Moran-Rodas, V. E. (2022). Abundance, Diversity, and Function of Soil Microorganisms in Temperate Alley-Cropping Agroforestry Systems: A Review. *Microorganisms*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030616>
- Bonaterra, A., Badosa, E., Daranas, N., Francés, J., Roselló, G., & Montesinos, E. (2022). Bacteria as Biological Control Agents of Plant Diseases. *Microorganisms*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091759>
- Camelo, D., Dubeux, J. C. B., Dos Santos, M. V. F., Lira, M. A., Fracetto, G. G. M., Fracetto, F. J. C., da Cunha, M. V., & de Freitas, E. V. (2021). Soil microbial activity and biomass in semiarid agroforestry systems integrating forage cactus and tree legumes. *Agronomy*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy11081558>
- Chaudhary, A., Poudyal, S., & Kaundal, A. (2025). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Maintaining Sustainable Agroecosystems. *Applied Microbiology (Switzerland)*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/app1microbiol5010006>
- De Souza, R., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. P. (2015). Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology*, 38(4), 401–419. <https://doi.org/10.1590/S1415-475738420150053>
- Dubey, A., Malla, M. A., Khan, F., Chowdhary, K., Yadav, S., Kumar, A., Sharma, S., Khare, P. K., & Khan, M. L. (2019). Soil microbiome: a key player for conservation of soil health under changing climate. *Biodiversity and Conservation*, 28(8–9), 2405–2429. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01760-5>
- Fedecacao. (2025). *Santander, Antioquia y Arauca reportaron la mayor producción de cacao en 2024. Sin embargo, el contrabando sigue siendo un flagelo.*

<https://www.fedecacao.com.co/post/santander-antioquia-y-araucareportaron-la-mayor-produccion-de-cacao-en-2024-sin-embargo-el-contr>

- Galeano Mendoza, C. H., Baquero Cubillos, E. F., Molina Varón, J. A., & Cerón Lasso, M. del S. (2018). Agronomic evaluation of bunching onion in the colombian Cundiboyacense high plateau. *International Journal of Agronomy*, 1(8). <https://doi.org/10.1155/2018/4940589>
- Garcia, A. R. M., Rocha, A. de P., Moreira, C. C., Rocha, S. L., Guarneri, A. A., & Elliot, S. L. (2016). Screening of Fungi for Biological Control of a Triatomine Vector of Chagas Disease: Temperature and Trypanosome Infection as Factors. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 10(11), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0005128>
- García, J. S. A., Hurtado-Salazar, A., & Ceballos-Aguirre, N. (2021). Current overview of hass avocado in Colombia. Challenges and opportunities: A review. *Ciencia Rural*, 51(8). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200903>
- Hanif, M. S., Tayyab, M., Baillo, E. H., Islam, M. M., Islam, W., & Li, X. (2024). Plant microbiome technology for sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1500260>
- Hartmann, M., & Six, J. (2023). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1), 4–18. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>
- Hasan, A., Tabassum, B., Hashim, M., & Khan, N. (2024). Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as a Plant Growth Enhancer for Sustainable Agriculture: A Review. *Bacteria*, 3(2), 59–75. <https://doi.org/10.3390/bacteria3020005>
- Hermans, S. M., Lear, G., Case, B. S., & Buckley, H. L. (2023). The soil microbiome: An essential, but neglected, component of regenerative agroecosystems. *IScience*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.isci>
- Jansson, J. K., McClure, R., & Egbert, R. G. (2023). Soil microbiome engineering for sustainability in a changing environment. *Nature Biotechnology*, 41(12), 1716–1728. <https://doi.org/10.1038/s41587-023-01932-3>

- Kuypers, M. M. M., Marchant, H. K., & Kartal, B. (2018). The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Reviews Microbiology*, 16(5), 263–276. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>
- Mamani De Marchese, A., & Filippone, M. P. (2018). Bioinsumos: componentes claves de una agricultura sostenible. *Rev. Agron. Noroeste Argent*, 38.
- Marulanda Medina, C. (2018). *Identificación de aislamientos de Phytophthora cinnamomi asociados aguacate en el sur occidente de Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/64244>
- Mooney, S. J., Castrillo, G., Cooper, H. V., & Bennett, M. J. (2024). Root-soil-microbiome management is key to the success of regenerative agriculture. *Nature Food*. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-01001-1>
- Moreno, A., García, V., Reyes, J. L., Vásquez, J., & Cano, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 20(1), 68–83. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707>
- Nahon, S. M. R., Trindade, F. C., Yoshiura, C. A., Martins, G. C., Costa, I. R. C. da, Costa, P. H. de O., Herrera, H., Balestrin, D., Godinho, T. de O., Marchiori, B. M., & Valadares, R. B. da S. (2024). Impact of Agroforestry Practices on Soil Microbial Diversity and Nutrient Cycling in Atlantic Rainforest Cocoa Systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(21). <https://doi.org/10.3390/ijms252111345>
- Pantigoso, H. A., Newberger, D., & Vivanco, J. M. (2022). The rhizosphere microbiome: Plant-microbial interactions for resource acquisition. *Journal of Applied Microbiology*, 133(5), 2864–2876. <https://doi.org/10.1111/jam.15686>
- Piliarová, M., Ondreičková, K., Hudcovicová, M., Mihálik, D., & Kraic, J. (2019). Arbuscular Mycorrhizal Fungi - Their Life and Function in Ecosystem. *Agriculture (Pol'nohospodarstvo)*, 65(1), 3–15. <https://doi.org/10.2478/agri-2019-0001>
- Rozpádek, P., Rapała-Kozik, M., Wężowicz, K., Grandin, A., Karlsson, S., Ważny, R., Anielska, T., & Turnau, K. (2016). Arbuscular mycorrhiza improves yield and nutritional properties of onion (*Allium cepa*). *Plant Physiology and Biochemistry*, 107, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.06.006>

- Sáenz, J., Cotes, A. M., & Díaz, A. (2013). Diseño y validación del proceso de producción por fermentación de biomasa de *Pseudomonas fluorescens* Ps006. *Agrosavia*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/19560>
- Shah, A. M., Khan, I. M., Shah, T. I., Bangroo, S. A., Kirmani, N. A., Nazir, S., Malik, A. R., Aezum, A. M., Mir, Y. H., Hilal, A., & Biswas, A. (2022). Soil Microbiome: A Treasure Trove for Soil Health Sustainability under Changing Climate. *Land*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/land11111887>
- Suárez, L. R., Suárez Salazar, J. C., Casanoves, F., & Ngo Bieng, M. A. (2021). Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 314, 107349. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107349>
- Taheri, P., Puopolo, G., & Santoyo, G. (2025). Plant growth-promoting microorganisms: New insights and the way forward. *Microbiological Research*, 297, 128168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micres.2025.128168>
- Thiele-Bruhn, S., Bloem, J., de Vries, F. T., Kalbitz, K., & Wagg, C. (2012). Linking soil biodiversity and agricultural soil management. In *Current Opinion in Environmental Sustainability* (Vol. 4, Issue 5, pp. 523–528). <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.004>
- UPRA, U. de P. R. A. (2024). *Resultados preliminares de las Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) – Diciembre 2024*. UPRA. https://upra.gov.co/es-co/Evas_Documentos/BolEVADic.pdf
- Vahter, T., Sepp, S. K., Astover, A., Helm, A., Kikas, T., Liu, S., Oja, J., Öpik, M., Penu, P., Vasar, M., Veromann, E., Zobel, M., & Hiiesalu, I. (2022). Landscapes, management practices and their interactions shape soil fungal diversity in arable fields – Evidence from a nationwide farmers’ network. *Soil Biology and Biochemistry*, 168, 108652. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108652>
- Volpiano, C. G., Lisboa, B. B., de São José, J. F. B., Beneduzi, A., Granada, C. E., & Vargas, L. K. (2022). Soil-plant-microbiota interactions to enhance plant growth. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 46. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210098>

Xu, P., & Wang, E. (2023). Diversity and regulation of symbiotic nitrogen fixation in plants. In *Current Biology* (Vol. 33, Issue 11, pp. R543–R559). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.04.053>