



Tema:

Determinación del efecto de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* spp. en la absorción de fósforo en el tejido vegetal.

Autores:

Monar Encarnación Samira Lisbeth y Yáñez Zambrano Ronald Fabricio

**Departamento de Ciencias de la Vida y Agricultura
Carrera de Ingeniería Agropecuaria**

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en
Agropecuaria

Director:

Ing. Mgs. Romero Salguero, Edison Javier

Santo Domingo de los Tsáchilas, 20 de marzo 2026

ANEXO 5 FORMATO MONAR_YANEZ

6%
Textos
sospechosos



6% Similitudes
0 % similitudes entre comillas
< 1 % entre las fuentes mencionadas
11% Idiomas no reconocidos (ignorado)
14% Textos potencialmente generados por la IA (ignorado)

Nombre del documento: ANEXO 5 FORMATO MONAR_YANEZ.pdf
ID del documento: 5a2bf849802d5ecfa515ce6a89b69afa60a35476
Tamaño del documento original: 1.76 MB

Depositante: EDISON JAVIER ROMERO SALGUERO
Fecha de depósito: 18/2/2026
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 18/2/2026

Número de palabras: 16.616
Número de caracteres: 139.449

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes de similitudes

Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	www.scielo.org.mx http://www.scielo.org.mx/pdf/rcsh/v29n3/2007-4034-rcsh-29-03-79.pdf 1 fuente similar	2%		Palabras idénticas: 2% (442 palabras)
2	TESIS_CHILLO_ACARO_ADRIAN_PAUL.docx TESIS_CHILLO_ACARO_ADR... #754ee5 Viene de de mi biblioteca 3 fuentes similares	1%		Palabras idénticas: 1% (312 palabras)
3	www.scielo.cl https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v41n3/0718-3429-idesia-41-03-69.pdf 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (141 palabras)
4	PROYECTO DE TITULACIÓN_REV_2.pdf PROYECTO DE TITULACIÓN_REV... #669a25 Viene de de mi biblioteca	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (168 palabras)
5	ugp.espe.edu.ec https://ugp.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2022/05/2022_bibl_gui_metologica_trabajo_titul... 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (61 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.espe.edu.ec Pertinencia del programa de posgrado en educación b... http://repositorio.espe.edu.ec:8080/bitstream/21000/14319/5/T-ESPE-057865.pdf.txt	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (27 palabras)
2	idesia.cl IDESIA, Revista de Agricultura en Zonas Áridas https://idesia.cl/?v=n&numid=185	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (24 palabras)
3	www.scielo.org.mx La disponibilidad del fósforo es producto de la actividad ba... https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pId=S0187-57792013000400231	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (15 palabras)
4	repositorio.inia.gob.pe https://repositorio.inia.gob.pe/bitstreams/b802b3c1-24e8-4dc3-8277-6b31e4bc6d24/download	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (15 palabras)
5	www.mendeley.com La importancia de la relación ent... preview & related info ... https://www.mendeley.com/catalogue/9d3e7194-6678-35af-8697-2d006392aa49/	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (16 palabras)

Ing, Mgs. Romero Salguero Edison Javier
C. C 1715875751



Departamento de Ciencias de la vida

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Determinación del efecto de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* spp. en la absorción de fósforo en el tejido vegetal.”** fue realizado por los señores Monar **Encarnación Samira Lisbeth**, Yáñez **Zambrano Ronald Fabricio**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Santo Domingo de los Tsáchilas, 20 de marzo 2026

Firma:

.....

Ing, Mgs. Romero Salguero Edison Javier

C.C 1715875751



Departamento de Ciencias de la vida

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Monar Encarnación Samira Lisbeth**, **Yánez Zambrano Ronald Fabricio** con cédulas de ciudadanía n° 2350191488, 2350314528, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: Título: **Determinación del efecto de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* spp. en la absorción de fósforo en el tejido vegetal**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Santo Domingo de los Tsáchilas, 20 de marzo 2026

Firma

.....
Monar Encarnación Samira Lisbeth
C.C. 2350191488

Firma

.....
Yánez Zambrano Ronald Fabricio
C.C. 2350314528



Departamento de Ciencia de la Vida

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Autorización de Publicación

Nosotros **Monar Encarnación Samira Lisbeth, Yánez Zambrano Ronald Fabricio** con cédulas de ciudadanía n° 2350191488, 2350314528, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: Título: **Determinación del efecto de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* spp. en la absorción de fósforo en el tejido vegetal** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Santo Domingo de los Tsáchilas, 20 de marzo 2026

Firma

.....
Monar Encarnación Samira Lisbeth
C.C. 2350191488

Firma

.....
Yánez Zambrano Ronald Fabricio
C.C. 2350314528

Dedicatoria

A Dios, que me dió fortaleza y sabiduría, que me guió en cada decisión, que me ha traído hasta este momento soñado, permitiéndome cumplir una de mis metas más anheladas.

A mi padre, Monar Enrique, que me ha sido mi inspiración y me inculcó valores humanos que agradeceré toda la vida; a mi madre, a quien admiro profundamente por su valentía y resiliencia; a mis hermanos Henry, Oscar, Bryan, Denisse, quienes nunca me han dejado sola y con quienes siempre hemos sido uno solo; y a mis cuñadas Jimena y Rosita, que han sido unas hermanas para mí.

Dedico este logro a toda mi familia y a todas las personas que han formado parte de mi vida, aportando aprendizajes de distintas maneras.

Y a mí, porque aunque a veces el camino fuera complicado, rendirme jamás fué una opción. Hoy, con profunda felicidad, cumplo una de mis más grandes metas. Con mucho amor, a todos ustedes que hicieron de este logro algo especial y verdaderamente memorable.

Monar Samira

A Dios, por ser el guía que me brindó la fuerza y sabiduría necesarias para alcanzar este objetivo que, en muchas ocasiones, parecía inalcanzable.

A mi hermosa familia, especialmente a mis padres, Gustavo Yáñez y Glenda Zambrano, quienes me entregaron las herramientas para perseverar y alcanzar esta meta tan anhelada. Asimismo, a mis hermanos y primos, por ser pilares fundamentales en mi trayectoria universitaria.

Dedico este logro a todos ustedes con el corazón lleno de gratitud; es un pequeño homenaje a su entrega incondicional y por haber creído en mí, incluso cuando yo mismo llegué a dudar.

Ronald Yáñez

Agradecimientos

Agradezco, en primer lugar, a Dios y a mis padres, quienes me han guiado siempre y me han inculcado los valores que hoy me forman como persona, por los sacrificios realizados desde el amor y por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A mi apreciada Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y a los docentes que la conforman, quienes han brindado sólidos cimientos que han contribuido significativamente a mi proceso de aprendizaje.

A mi tutor de tesis, Ing. Javier Romero, quien, con su vocación docente y su don para transmitir conocimientos, ha marcado de manera positiva mi formación académica, guiándonos y apoyándonos de forma constante hasta alcanzar este logro.

A don Párraga y don Díaz, por su total predisposición y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

A la Ing. Katty, quien ha sido de gran ayuda y nos ha acompañado con muchísima paciencia a lo largo de este proceso.

A mi gran amigo y compañero de tesis, Ronald Yáñez, quien me ha enseñado el verdadero significado de la amistad. Gracias por tu confianza, paciencia y lealtad.

A mis amigos Rashel V., Ariel C., Josué G., Jhon S. y Jayder G., por su apoyo a lo largo de esta aventura académica.

A mis amigas Nicole C., Milena P., Yarelin C. y Katty V., quienes, aún desde la distancia, siempre han estado conmigo.

Finalmente, agradezco a todas las personas que han sido parte de este camino que nos ha traído hasta este momento. Los quiero mucho.

Monar Samira

Agradecimientos

Agradezco profundamente a Dios y a mis padres por ser los grandes promotores de mis sueños. Gracias por los innumerables sacrificios que han realizado para que hoy pueda alcanzar mis metas.

A mi apreciada Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y al distinguido cuerpo docente que la conforma. Extiendo mi sincero agradecimiento a cada uno de los maestros que guiaron mi formación académica.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi tutor de tesis, el Ingeniero Javier Romero, por su invaluable paciencia, orientación y dedicación a lo largo de este proceso. Sus conocimientos y acertados consejos fueron fundamentales para fortalecer mis capacidades y culminar con éxito esta etapa tan significativa de mi vida profesional.

Mi reconocimiento a don Párraga, don Díaz y la Ing. Katty, por su apoyo técnico y disposición constante durante el desarrollo de este trabajo.

A Samira Monar, mi eterno agradecimiento por tu paciencia incondicional y por la confianza que depositaste en mí durante todo este trayecto. Gracias por estar presente en cada desafío y celebrar cada triunfo como propio.

A mis amigos Rashel V., Ariel C., Saúl V., Josué G., Jhon S., Jayder G., Anthony L., Katherine C. y Edwin V., quienes formaron parte de este largo trayecto académico. Gracias por estar siempre dispuestos a escuchar, por compartir una risa en los momentos de tensión y por ofrecer el consejo justo cuando más se necesitaba. Gracias por su amistad incondicional y por hacer de este camino una experiencia inolvidable.

Finalmente, agradezco a todos aquellos que brindaron su apoyo moral y profesional a lo largo de esta trayectoria. Este logro es el resultado de un esfuerzo colectivo y del acompañamiento invaluable que recibí en cada etapa de este camino.

Ronald Yáñez

Índice

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Estado del arte	4
Objetivos:.....	8
Objetivo General:	8
Objetivos Específicos:	8
Hipótesis.....	9
Hipótesis Nula.	9
Hipótesis Alternativa.	9
Marco teórico	10
Ají.	10
Capsicum chinense.....	10
Taxonomía del ají.....	11
Descripción morfológica.....	11
Forma.	11
Hojas.	12
Tronco / Ramas.....	12
Flores.....	12
Fruto.	12
Las semillas.	13
Condiciones edafoclimáticas.....	13
Fósforo.	14
Los microorganismos como fuentes dinamizadoras de Fósforo.....	18
Trichoderma spp.	21
Micorrizas	23
Evaluación del fósforo absorbido por el método DVS.....	24
Metodología/Técnicas/Diseño.....	25
Ubicación del área experimental	25
Ubicación política	25
Ubicación Geográfica.....	25
Ubicación Ecológica.....	26
Ubicación Ecológica.....	26
Métodos.....	30
Establecimiento del ensayo.	30
Delimitación de la Unidad Experimental.....	30
Instalación de sistema de riego.....	30
Inoculación de tratamientos.	31

Aplicación de Trichodermas.	31
Aplicación de Micorrizas.	31
Hoyado, aplicación de humus con tratamientos, fertilizante y siembra.	31
Control de malezas.	32
Fertilización.	32
Manejo fitosanitario.	32
Toma de datos en campo.	33
Análisis de laboratorio.	33
Contenido nutricional a nivel radicular.	34
Análisis de la calidad físico-química del fruto.	34
Diseño.	34
Diseño experimental.	34
Análisis estadístico.	35
Análisis funcional.	35
Características generales.	35
Variables a evaluar.	36
Croquis.	36
Resultados.	37
Análisis de ANOVA para la variable altura y número de hojas a los 21 días después de la siembra.	37
Altura.	37
Número de hojas.	37
Análisis de ANOVA para la variable altura y número de hojas a los 35 días después de la siembra.	39
Altura.	39
Número de hojas.	41
TRATAMIENTO.	42
Análisis de ANOVA para la variable altura y número de hojas a los 49 días después de la siembra.	43
Altura.	43
Análisis de ANOVA para la variable altura a los 63 días después de la siembra.	43
Altura.	43
Análisis de ANOVA para la variable número de flores a los 93 días después de la siembra.	45
Número de flores.	45
Número de frutos.	48
°Brix.	50
pH.	51
Dureza.	51
Peso de la raíz.	52
Peso del fruto.	53
Rendimiento de Capsaicina.	54

Análisis radicular	55
Análisis Costo-Beneficio	58
Costos de producción variables.....	59
Rentabilidad y relación costo-beneficio	60
Conclusiones	61
Recomendaciones	62
Referencias bibliográficas	63

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación taxonómica de <i>Capsicum chinense</i> Jacq	11
Tabla 2. Ubicación ecológica	26
Tabla 3. Preparación, delimitación y surcado de la parcela demostrativa	27
Tabla 4. Instalación del sistema de riego por aspersión	27
Tabla 5. Fertilización, inóculos y siembra de ají	28
Tabla 6. Inóculos utilizados en los tratamientos	28
Tabla 7. Control de malezas	29
Tabla 8. Control fitosanitario	29
Tabla 9. Nutrición foliar.....	29
Tabla 10. Plan de fertilización	32
Tabla 11. Tratamientos aplicados en cada repetición	34
Tabla 12. Esquema de ADEVA.....	35
Tabla 13. Características del Área Experimental.....	35
Tabla 14. Análisis de varianza para la altura variable a los 21 días de la siembra	37
Tabla 15. Análisis de varianza para la variable del número de hojas a los 21 días de la siembra	37
Tabla 16. Análisis de medias para la variable altura y número de hojas a los 21 días de la siembra	39
Tabla 17. Análisis de varianza para la variable altura a los 35 días de la siembra	40
Tabla 18. Análisis de varianza para la variable número de hojas a los 35 días de la siembra	41
Tabla 19. Análisis de medias para la variable altura y número de hojas a los 35 días de la siembra	42
Tabla 20. Análisis de varianza para la variable altura a los 49 días de la siembra	43
Tabla 21. Análisis de varianza para la variable altura a los 63 días de la siembra	44
Tabla 22. Análisis de varianza para la variable número de flores a los 93 días de la siembra....	45
Tabla 23. Análisis de varianza para la variable número de frutos a los 126 días de la siembra..	47
Tabla 24. Costos para el establecimiento y mantenimiento del cultivo de ají	57
Tabla 25. Costos de producción variables por tratamiento (T1, T2, T3 y T4)	58
Tabla 26. Análisis de rendimiento y rentabilidad económica de los tratamientos evaluados.....	59

Índice de figuras

Figura 1. Transformación del Fósforo en el Suelo.....	16
Figura 2. Mapa de localización del ensayo experimental	26
Figura 3. Croquis de distribución de las unidades experimentales	36
Figura 4. Comparación de medias mediante el Test de Tukey para la interacción tratamiento en la variable número de hojas a los 21 días de la siembra.....	38
Figura 5. Comparación de medias mediante el Test de Tukey para la interacción tratamiento en la variable altura de la planta a los 35 días de la siembra	41
Figura 6. Comparación de medias mediante el Test de Tukey para la interacción tratamiento en la variable altura de la planta a los 63 días de la siembra	45
Figura 7. Comparación de medias mediante el Test de Tukey para la interacción tratamiento en la variable número de flores por planta a los 93 días de la siembra	47
Figura 8. Comparación de medias mediante el Test de Tukey para la interacción tratamiento en la variable número de frutos a los 126 días de la siembra	48
Figura 9. Contenido de sólidos solubles totales (°Brix) en los frutos según el tratamiento aplicado.....	49
Figura 10. Potencial de hidrógeno (pH) medido en los frutos según el tratamiento aplicado.....	50
Figura 11. Dureza de los frutos cosechados según el tratamiento aplicado.....	51
Figura 12. Peso de la raíz (g) obtenido según el tratamiento aplicado	51
Figura 13. Peso promedio del fruto por tratamiento	52
Figura 14. Rendimiento de capsaicina (g) en los frutos según el tratamiento aplicado	53
Figura 15. Métodos de referencia y protocolos de análisis foliar para tejido radicular.....	54

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y *Trichoderma* spp. en la absorción de fósforo en el tejido vegetal de ají, considerando su potencial como alternativa biológica sostenible. El estudio se desarrolló en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en Santo Domingo de los Tsáchilas, bajo condiciones de campo y con un diseño experimental que incluyó tratamientos individuales (*Trichoderma* spp., Micorriza y Testigo) y un tratamiento combinado (*Trichoderma* + Micorriza). Se evaluaron variables agronómicas como altura de planta, número de hojas, flores y frutos, peso del fruto, tamaño radicular y producción total. Asimismo, se analizaron parámetros de calidad del fruto (°Brix, pH, dureza y contenido de capsaicina) y el contenido de fósforo mediante el método de Digestión Vía Seca (DVS). Complementariamente, se verificó la colonización micorrízica y la densidad poblacional de *Trichoderma* en laboratorio. Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre tratamientos, destacándose la interacción *Trichoderma* + Micorriza, que presentó mayor absorción de fósforo y mejor desarrollo vegetativo en comparación con el testigo. Estos hallazgos sugieren que la combinación de microorganismos favorece la solubilización del fósforo y promueve el crecimiento vegetal, constituyéndose en una alternativa sostenible para mejorar la productividad del cultivo de ají.

Palabras clave

- Ají, microorganismo, inóculo, variedad .

Abstract

The present study aimed to evaluate the effect of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and *Trichoderma* spp. on phosphorus absorption in chili plant tissue, considering their potential as a sustainable biological alternative. The research was conducted at the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, located in Santo Domingo de los Tsáchilas, under field conditions using an experimental design that included individual treatments (*Trichoderma* spp., Mycorrhiza, and Control) and a combined treatment (*Trichoderma* + Mycorrhiza). Agronomic variables such as plant height, number of leaves, flowers, and fruits, fruit weight, root size, and total yield were evaluated. In addition, fruit quality parameters (°Brix, pH, firmness, and capsaicin content) and phosphorus concentration were analyzed using the Dry Ash Digestion (DAD) method. A complementary laboratory phase was carried out to verify mycorrhizal colonization and the population density of *Trichoderma* in the rhizosphere. The results showed significant differences among treatments, highlighting the *Trichoderma* + Mycorrhiza interaction, which demonstrated higher phosphorus uptake and improved vegetative growth compared to the control. These findings suggest that the combined use of these microorganisms enhances phosphorus solubilization and promotes plant growth, representing a sustainable strategy to improve chili crop productivity.

Keywords

- Chili pepper, microorganism, inoculum, variety.

Introducción

En las regiones tropicales, la producción hortícola ha experimentado un notable incremento durante la última década, impulsado principalmente por la creciente demanda de cultivos con un alto valor gastronómico, industrial y comercial. Entre ellos, el ají (*Capsicum chinense* Jacq.) sobresale por su importancia económica y por su contribución a la diversificación agrícola en las zonas cálidas del Ecuador, donde existen pequeños y medianos productores lo consideran una alternativa rentable frente a los sistemas tradicionales. A pesar de esto se alcanzan rendimientos competitivos por lo que continúan siendo un desafío, especialmente en los suelos ácidos y fuertemente meteorizados típicos de los ambientes tropicales. En este tipo de suelos, la disponibilidad de nutrientes esenciales, en particular del fósforo (P) por lo que se encuentra considerablemente restringida, lo que limita el desarrollo óptimo del cultivo.

El fósforo constituye un nutriente clave para el crecimiento y la productividad del ají, pero su aprovechamiento se ve restringido por procesos de fijación que lo inmovilizan en el suelo, reduciendo drásticamente su eficiencia de absorción por las raíces. Esta condición ha llevado a los agricultores a depender de fertilizantes fosfatados de síntesis química, cuyo uso prolongado incrementa los costos de producción y, a largo plazo, puede afectar negativamente la estructura y funcionalidad del suelo. Frente a este escenario, surge un creciente interés por alternativas que permitan mejorar la eficiencia en el uso del P sin comprometer la sostenibilidad de los sistemas productivos.

Dentro de estas alternativas, los microorganismos benéficos del suelo han cobrado relevancia por su capacidad de optimizar la nutrición mineral y fortalecer el desempeño fisiológico de los cultivos. En particular, los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y

las especies del género *Trichoderma* se han destacado por su potencial para incrementar la absorción de fósforo, ampliar la exploración radical y mejorar la tolerancia de las plantas frente a condiciones adversas. Estudios recientes en diversos cultivos demuestran que estos microorganismos pueden incrementar el contenido de P en tejido vegetal, mejorar el crecimiento aéreo y radical, e incluso potenciar la respuesta productiva bajo condiciones de baja fertilidad. A pesar de estos avances, el comportamiento conjunto de HMA y *Trichoderma* en el cultivo de ají sigue siendo poco explorado, especialmente en las condiciones edáficas de los trópicos húmedos ecuatorianos.

Ante la necesidad de fortalecer la sostenibilidad del cultivo de ají y reducir la dependencia de fertilizantes fosfatados químicos, se plantea evaluar el efecto de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* spp. sobre la disponibilidad de fósforo en el suelo y su absorción por la planta. Para ello, esta investigación implementa parcelas experimentales con distintos esquemas de inoculación, con el fin de determinar su aporte al crecimiento, desarrollo y rendimiento del ají bajo condiciones de campo. Los resultados esperados contribuirán a generar bases científicas para desarrollar estrategias de biofertilización adaptadas a los sistemas productivos locales, promoviendo prácticas agrícolas que mejoren la eficiencia nutricional y fortalezcan la sostenibilidad ambiental de la producción hortícola.

Estado del arte

La disponibilidad de fósforo (P) en los suelos tropicales constituye una de las limitantes más relevantes para la productividad agrícola debido a su baja movilidad, su fuerte fijación por óxidos de hierro y aluminio, y su elevada tendencia a formar complejos

insolubles. Esta situación es especialmente crítica en regiones tropicales de Latinoamérica, donde la degradación histórica del suelo, el bajo contenido de materia orgánica y la acidificación progresiva han reducido significativamente la disponibilidad de nutrientes esenciales. En este contexto, Gadea y Peña (2013) sostienen que la dependencia prolongada de fertilizantes fosfatados sintéticos no ha logrado revertir la baja eficiencia del fósforo en el suelo y, en muchos casos, ha contribuido al deterioro de la salud del agroecosistema. Los autores proponen que los hongos micorrízicos arbusculares (VAM) no deben considerarse simplemente como un insumo agrícola, sino como un elemento fundamental en la gestión sostenible del suelo. Esto se debe a su capacidad para liberar fósforo retenido, mejorar la estructura del suelo y movilizar oligoelementos que no se encuentran disponibles mediante prácticas convencionales de fertilización.

A partir de estas consideraciones, surge la importancia de comprender la interacción entre organismos del suelo y la planta. La compatibilidad microbiana es un factor crítico para el éxito de las biofertilizaciones. En estudios realizados con *Solanum lycopersicum*, Arias Mota (2019) demostró que los hongos micorrízicos arbusculares mantienen un alto porcentaje de colonización (hasta 66 %), incluso cuando se combinan con microorganismos solubilizadores como *Aspergillus niger*, esta compatibilidad es fundamental, ya que refleja la capacidad de los consorcios microbianos para operar simultáneamente sin antagonismos, favoreciendo una mayor disponibilidad de fósforo. Por lo tanto, el resultado más significativo reportado por el autor fue el incremento del contenido foliar de P en un 191 % respecto al testigo, lo que demuestra que la micorriza funciona como una vía de transporte eficiente, permitiendo que el fósforo liberado por microorganismos solubilizadores sea rápidamente absorbido y translocado.

Esta relación simbiótica se vuelve aún más relevante cuando se analiza el comportamiento del fósforo en el suelo. Mora-Quilismal (2021), en sus investigaciones con el cultivo de papa, enfatiza que el éxito agronómico no depende exclusivamente de la solubilización microbiana del fósforo, sino del establecimiento de una red de hifas extrarradicales generada por los hongos micorrízicos. Estas estructuras incrementan exponencialmente el volumen de suelo explorado por las raíces, permitiendo a la planta acceder a formas de P que se encuentran inmovilizadas en microporos inaccesibles mediante la absorción radical directa. Este mecanismo explica por qué, incluso bajo la aplicación de dosis reducidas de fertilizantes químicos, los cultivos fortificados con micorrizas presentan respuestas agronómicas superiores, tanto en desarrollo vegetativo como en parámetros productivos.

En esta misma línea, Marín-Salazar et al. (2023) destacan que la contribución de las micorrizas se extiende a nutrientes de baja movilidad como el zinc (Zn). En su revisión, los autores señalan que la combinación de hongos micorrízicos con *Trichoderma* genera una sinergia positiva en la movilización y absorción de estos elementos, promoviendo mejoras significativas en el crecimiento vegetativo y la floración del tomate (*Solanum lycopersicum*). Este hallazgo es importante, ya que sugiere que cultivos como papa y cacao los cuales presentan requerimientos nutricionales similares pueden beneficiarse de consorcios microbianos que aborden de manera integral limitantes múltiples, no solo el fósforo.

El género *Trichoderma* ha sido históricamente valorado como agente de biocontrol; sin embargo, investigaciones recientes han ampliado su reconocimiento como promotor del crecimiento vegetativo y facilitador de la nutrición mineral. Erazo et al. (2020), trabajando con la cepa *T. harzianum*, reportaron su capacidad para movilizar fósforo

insoluble y facilitar su ingreso a la planta en condiciones de campo, además de confirmar su avirulencia. Este resultado permitió replantear el rol de *Trichoderma* dentro de los consorcios microbianos, pasando de ser percibido únicamente como un protector contra patógenos a ser entendido como un actor clave en la eco-fisiología de la rizósfera.

Complementariamente, Rojas Chaparro (2023) evaluó la interacción entre *Trichoderma* spp. y diferentes dosis de fertilización fosfatada (hasta 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅) en el cultivo de tomate. Su diseño bifactorial permitió observar una interacción significativa en el desarrollo radicular: las mejores respuestas en longitud (0,62 m) y masa fresca de raíz (58 g) se obtuvieron al combinar la inoculación con la dosis más alta de P₂O₅. Este hallazgo demuestra que, además de solubilizar fósforo inmovilizado, *Trichoderma* tiene la capacidad de incrementar la eficiencia del fósforo disponible, optimizando la utilización de los fertilizantes aplicados. Esta característica resulta fundamental en sistemas agrícolas que buscan reducir costos, mejorar la sostenibilidad y minimizar la dependencia de insumos químicos.

Pese a la amplia evidencia sobre los efectos solubilizadores de *Trichoderma*, investigaciones recientes han puesto en duda la magnitud de este mecanismo como factor principal. Ortiz-Calcina et al. (2023), en un ensayo con quinua (*Chenopodium quinoa*) en Puno (Perú), encontraron que la inoculación con diferentes cepas de *Trichoderma* no generó cambios significativos en los niveles de N, P y K del suelo. No obstante, observaron incrementos notorios en los contenidos de fósforo y potasio en el tejido vegetal de las plantas inoculadas. Este resultado sugiere que la mejora nutricional obtenida no necesariamente se debe a una mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo, sino a una mayor eficiencia de absorción asociada al desarrollo de un sistema

radical más vigoroso y extenso. De esta manera, se refuerza la hipótesis de que *Trichoderma* potencia la fisiología de la planta, más que alterar la química del suelo.

En conjunto, la evidencia científica revisada demuestra que la biofertilización basada en hongos micorrízicos y *Trichoderma* representa una alternativa sólida para enfrentar la baja disponibilidad de fósforo en los sistemas agrícolas tropicales. Estos microorganismos no solo contribuyen a movilizar el fósforo residual, sino que también mejoran la eficiencia de uso del P aplicado, potencian el desarrollo radicular, amplían el volumen de suelo explorado, y fortalecen la fisiología vegetal. La adopción de consorcios microbianos adaptados a las condiciones edafoclimáticas de cada región emerge así como una estrategia esencial para avanzar hacia sistemas agrícolas sostenibles, resilientes y menos dependientes de insumos externos.

Objetivos:

Objetivo General:

- Determinar el efecto de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* spp. en la absorción de fósforo en el tejido vegetal..

Objetivos Específicos:

- Implementar parcelas experimentales con tratamientos de inoculación de HMA, *Trichoderma* spp. y su coinoculación, en el cultivo de ají.

- Determinar la absorción de fósforo por el cultivo en función de cada uno de los tratamientos.
- Evaluar la colonización micorrízica y la densidad poblacional de *Trichoderma* spp. en la rizosfera.
- Analizar el efecto de los tratamientos sobre parámetros agronómicos (altura, número de hojas, flores, frutos, peso del fruto, tamaño de la raíz, producción) y bromatológicos (°brix, pH, dureza, contenido de capsaicina), del cultivo de ají.

Hipótesis.

Hipótesis Nula.

No existe diferencia significativa entre los tratamientos aplicados para la evaluación de la efectividad de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* spp. en la absorción de fósforo en el tejido vegetal.

Hipótesis Alternativa.

Al menos un tratamiento aplicado genera diferencia significativa para la evaluación de la efectividad de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* spp. en la absorción de fósforo en el tejido vegetal.

Marco teórico

Ají.

El género *Capsicum*, al que pertenecen todos los pimientos y chiles, tiene su centro de origen primario en la Cuenca del Amazonas, con áreas de alta diversidad genética localizadas en regiones que comprenden Perú y Bolivia (Muñoz et al., 2020). Su domesticación es un evento prehispánico, y su dispersión inicial fue facilitada por las culturas indígenas en Mesoamérica y Sudamérica.

Solo cinco especies de *Capsicum* han sido domesticadas y cultivadas a nivel global: *C. annuum*, *C. frutescens*, *C. baccatum*, *C. pubescens* y *C. chinense* Jacq.. Tras la llegada de los españoles a América, el ají fue rápidamente extendido a nivel mundial, alcanzando Europa y Asia, y hoy su cultivo se ha industrializado en países como China, India, España y Estados Unidos, además de mantener una relevancia central en las cocinas tradicionales americanas.

Capsicum chinense.

La especie es reconocida globalmente por el picor y los atributos sensoriales que ha desarrollado en su centro de diversificación secundaria: la Península de Yucatán, México (Muñoz-Ramírez et al., 2020). El habanero se distingue por ser uno de los ajíes más picantes, con niveles de pungencia que generalmente oscilan entre 100,000 y 300,000 Unidades de Calor Scoville (SHU) (Vera, 2015). Sin embargo, las variedades criollas de la Península de Yucatán son excepcionalmente intensas, superando frecuentemente las 500,000 SHU y alcanzando récords superiores a 892,000 SHU

(Canto-Flick et al., 2018). Esta pungencia extrema se atribuye a las condiciones edafoclimáticas particulares de la región.

En reconocimiento a estas características distintivas, el chile habanero cultivado en esta zona fue galardonado con la Denominación de Origen (DO) "Chile Habanero de la Península de Yucatán" en 2010 (Muñoz et al., 2020).

Taxonomía

Tabla 1.

Clasificación taxonómica de Capsicum chinense Jacq.

Taxonomía del ají	
Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Subclase	<i>Asteridae</i>
Orden	<i>solanases</i>
Suborden	<i>Solaninae</i>
Familia	<i>Solanaceae</i>
Género	<i>Capsicum</i>
Especie	<i>Capsicum chinense</i> Jacq.

Nota: Elaboración propia basada en la adaptación de diversas fuentes taxonómicas

Descripción morfológica.

Forma.

El ají habanero es una planta de porte arbustivo y crecimiento vigoroso que, en condiciones de cultivos controladas, puede alcanzar hasta una altura de 1,5 m, mostrando buena adaptación y rendimiento de distintos ambientes (Silva et al., 2022).

Hojas.

Presenta una copa compacta y extendida, con follaje abundante y hojas de disposición alterna además, estas son grandes, elípticas, con márgenes lisos y ápices agudos. En promedio, las hojas alcanzan longitudes de entre 18 y 30 cm y anchos de 6 a 12 cm, mostrando un color verde intenso en el haz y más claro en el envés, lo que indica una buena actividad fotosintética y adaptación a condiciones de alta radiación (Baruah et al., 2024).

Tronco / Ramas.

Este es herbáceo y verde claro, pero con el desarrollo se vuelve semileñoso y firme, proporcionando soporte a la planta además, surgen ramas alternas y ascendentes, de color verde a marrón claro, que forman una copa equilibrada y resistente, facilitando la ventilación y captación de luz para un mejor crecimiento (García et al., 2022).

Flores.

Las flores se disponen mayoritariamente en grupos de dos a tres flores por nudo (≈ 74 % de las accesiones presentaron 2 flores por nudo) y, en menor proporción, tres flores; la corola mide entre unos 6,5-8 mm de largo y 10-15 mm de diámetro, es de color blanco-verdoso con ocasiones de manchas púrpuras externas o internas; los pedículos florales presentan longitud de 12-20 mm, son erectos o ligeramente extendidos y en formas domesticadas tienden a ser péndulos, mientras que las formas silvestres los presentan geniculados en la antesis (Mata et al., 2021).

Fruto.

Los frutos muestran una forma altamente variable dentro de la especie, con longitudes que oscilan entre aproximadamente 40 mm y más de 70 mm, y un índice de forma que va de

1.8 a más de 3.0 (lo que indica frutos de perfil alargado a muy alargado); presentan paredes de pericarpio relativamente gruesas en accesiones seleccionadas para calidad, lo que los hace más robustos para procesamiento, y combinación de colores de madurez que van del verde-claro al rojo-intenso o naranja-profundo dependiendo del acceso, reflejando una alta diversidad morfológica intraespecífica (Ozga et al., 2021).

Las semillas.

Las semillas presentan una forma subglobosa o ligeramente en forma de “C”, con una longitud promedio de alrededor de 4,3 mm y un ancho de aproximadamente 1,4 mm; el número promedio fue de ~16,4 semillas por fruto y el color típico es amarillo pálido a casi blanco, lo que distingue a esta especie de otras del género *Capsicum* (García-Ruiz et al., 2020).

Condiciones edafoclimáticas.

Las condiciones edafoclimáticas del *Capsicum chinense* Jacq. (ají o chile habanero) influyen de manera determinante en su desarrollo, productividad y calidad de los frutos. Esta especie se adapta principalmente a zonas tropicales y subtropicales, con temperaturas óptimas de 25 a 30 °C y una humedad relativa de entre 60 y 80 %. Requiere alta luminosidad para favorecer la floración y fructificación, ya que la sombra excesiva reduce la producción y el contenido de capsaicinoides. En cuanto al suelo, prospera mejor en suelos francos o franco-arenosos, bien drenados, ricos en materia orgánica, con pH entre 5,5 y 7,0, evitando suelos compactados o con encharcamiento, que afectan el desarrollo radicular y aumentan la susceptibilidad a enfermedades fúngicas. Además, la planta es sensible a las bajas temperaturas (por debajo de 15 °C) y a los vientos fuertes, por lo que se recomienda su cultivo en áreas protegidas o con cortinas rompevientos. Estas condiciones garantizan un crecimiento vigoroso, buena floración y frutos con alta calidad organoléptica y fitoquímica, esenciales para su valor comercial y agroindustrial (Morales et al., 2023).

Fósforo.

El fósforo (P) es un nutriente indispensable para la vida, ya que interviene en procesos metabólicos esenciales y forma parte de moléculas estructurales y energéticas fundamentales además, está presente en fosfolípidos, en los ácidos nucleicos (ARN y ADN) y en el ATP, que es el principal compuesto involucrado en la transferencia de energía y en numerosas reacciones celulares (White y Metcalf, 2007). En el caso de las plantas y de los microorganismos del suelo, este elemento se obtiene principalmente de la solución edáfica, donde se encuentra en formas inorgánicas más disponibles, como el ortofosfato (PO_4^{3-}). Sin embargo, debido a su alta reactividad química y a la intensa demanda biológica, esta fracción soluble se reduce con rapidez.

Algunos microorganismos poseen la capacidad de aprovechar fuentes alternativas de fósforo, como ciertos compuestos organofosforados con menor estado de valencia (+3), entre ellos los fosfonatos. Este tipo de moléculas se caracteriza por presentar un enlace carbono-fósforo (C-P), cuyo rompimiento requiere mayor energía, aunque determinadas bacterias y hongos cuentan con las rutas metabólicas necesarias para liberarlo (White & Metcalf, 2007). A esto se suma que diversos microorganismos sintetizan ácidos orgánicos que modifican el pH en la rizósfera, facilitando la liberación de iones fosfato desde las superficies minerales y, con ello, aumentando la disponibilidad del nutriente para la biota del suelo (Coyne, 1999).

El fósforo presente en el suelo no se encuentra en una única forma, sino que se distribuye en fracciones con diferentes niveles de disponibilidad. Los estudios suelen diferenciarlas en tres categorías: fósforo lábil (de fácil acceso), moderadamente lábil y fósforo ocluido, este último prácticamente inaccesible debido a su fuerte asociación con las partículas del suelo (Selmants & Hart, 2010). Como las plantas y muchos microorganismos absorben fósforo principalmente en forma inorgánica (Pi), la disponibilidad real del elemento depende de

la mineralización del fósforo orgánico (Po). Esta transformación es llevada a cabo por enzimas hidrolíticas, entre ellas las fosfatasas, que suelen ser más activas en la rizósfera. Tanto las raíces de las plantas (López et al., 2004) como diversos microorganismos del suelo (Quanet, 2003) liberan fosfohidrolasas extracelulares que facilitan este proceso (Ezawa et al., 2005). En general, plantas y hongos producen fosfatasas ácidas, mientras que muchas bacterias sintetizan fosfatasas alcalinas (Tarafdar y Marschner, 1994).

La absorción de fósforo por la planta ocurre principalmente a través de los pelos radiculares y de las puntas de la raíz, aunque las micorrizas juegan un rol determinante al ampliar el volumen explorado por el sistema radical. La forma más absorbida es el ion ortofosfato primario (H_2PO_4^-), aunque en condiciones de pH más elevado también se incrementa la captación de HPO_4^{2-} . Una vez dentro de la planta, el fósforo puede almacenarse en las raíces o movilizarse hacia los órganos aéreos, donde se integra en compuestos como ácidos nucleicos, fosfolípidos, enzimas y moléculas energéticas como el ATP. Tanto los iones ortofosfato como el fósforo incorporado en compuestos orgánicos pueden ser redistribuidos a otras partes de la planta según las demandas fisiológicas (Múnera Vélez & Germán Antonio, 2014).

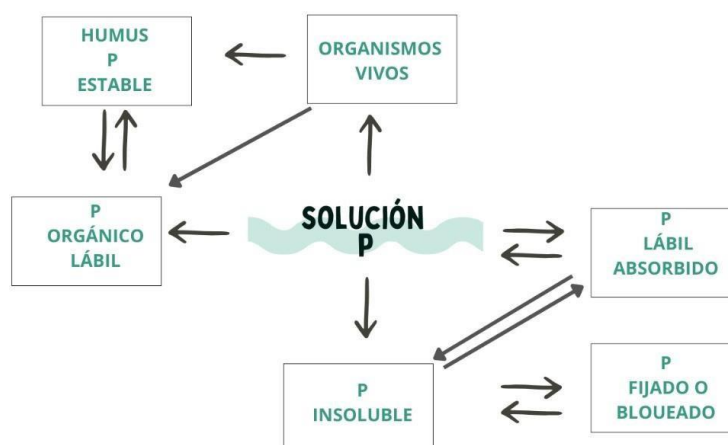
En muchas zonas tropicales, los suelos presentan niveles muy bajos de fósforo disponible debido a la fuerte capacidad de fijación que caracteriza a los suelos rojos y a los derivados de cenizas volcánicas. Esto provoca que los cultivos tengan rendimientos limitados si no se aplican fertilizantes fosfatados, los cuales deben usarse en cantidades elevadas para compensar la inmovilización del nutriente. Por ello, las prácticas de fertilización y la interpretación de los análisis de suelo deben considerar la química del fósforo y su comportamiento en estos ambientes edáficos (Múnera & Germán, 2014).

La concentración de fósforo en la solución del suelo es un factor determinante para su absorción por parte de las raíces por lo tanto, el movimiento del nutriente hacia la planta ocurre

principalmente por difusión, proceso que depende del gradiente de concentración entre la raíz y el suelo, así como de las interacciones entre el fósforo soluble y el adsorbido en la fase sólida. En suelos minerales ácidos, esta adsorción está regulada por la presencia y características de los óxidos hidratados de hierro y aluminio, además del aluminio intercambiable, que influyen de manera directa en la disponibilidad final del fósforo para las plantas.

Figura 1.

Transformación del Fósforo en el Suelo (Múnera Vélez y Germán Antonio, 2014).



Este sistema agrícola, dependiente del uso de insumos externos (fertilizantes y pesticidas), intensifica la acidez del suelo y disminuye la disponibilidad de fósforo (Bayuelo et al., 2019).

El fósforo (P) es un nutriente cuya dinámica merece especial atención, sobre todo en contextos donde el cambio de uso del suelo altera los ciclos bioquímicos y la disponibilidad de nutrientes esenciales. Diversos estudios señalan que, después del nitrógeno, el fósforo es el elemento que más limita la producción agrícola a nivel global (Maranguit et al., 2017). En

particular, los Andisoles suelos jóvenes desarrollados a partir de cenizas volcánicas presentan una fuerte capacidad de fijación debido a su elevada concentración de sesquióxidos, lo que provoca que el P se absorba o quede químicamente retenido, disminuyendo significativamente su disponibilidad para las plantas (Takahashi & Dahlgren, 2016).

La distribución y forma en que el fósforo se encuentra en el suelo depende de múltiples factores, entre ellos la composición mineralógica, la presencia de coloides, el pH, la actividad de la microbiota y las demandas propias del cultivo. En ambientes ácidos, el P suele formar compuestos de baja solubilidad con hierro (Fe) y aluminio (Al), mientras que en suelos alcalinos tiende a reaccionar con calcio (Ca), generando de igual manera formas poco disponibles para la absorción vegetal (Zhang, 2024). A estos procesos se suman los efectos de los ácidos orgánicos liberados por microorganismos o por la propia descomposición de la materia orgánica; dichos compuestos pueden complejar cationes como Fe, Al o Ca, liberando así fósforo hacia fracciones más solubles y aprovechables (Giles, 2023).

El componente biológico del suelo es uno de los principales reguladores de la disponibilidad del fósforo (P). Las comunidades microbianas transforman el fósforo orgánico en inorgánico mediante la secreción de enzimas como fosfatasas, fitasas y fosfodiesterasas, que intervienen directamente en la mineralización de compuestos fosforados (Duan et al., 2025). La eficacia de este proceso está estrechamente ligada a la disponibilidad de carbono y nitrógeno, los cuales condicionan la actividad metabólica de los microorganismos y, por ende, su capacidad para liberar fósforo hacia la solución del suelo (Wan, 2025).

Además, existen microorganismos especializados en la solubilización de P desde formas minerales poco accesibles. Entre ellos destacan bacterias y hongos solubilizadores, así como los hongos micorrícicos arbusculares, que amplían la superficie de exploración radicular y facilitan el movimiento del fósforo desde zonas alejadas de la raíz. El manejo orgánico del suelo, mediante prácticas como la incorporación de compost o materia orgánica fresca,

favorece el desarrollo de estos organismos, mejora la estructura del suelo y estimula la liberación de ácidos orgánicos, potenciando así la disponibilidad del nutriente.

Considerando estos aspectos, aunque factores como la mineralogía o el pH no pueden modificarse fácilmente, la actividad biológica del suelo sí puede ser gestionada mediante prácticas agrícolas sostenibles. Por ello, el manejo biológico del fósforo se posiciona como una estrategia clave para mejorar la eficiencia en su uso y sostener la productividad de los sistemas agrícolas (Moulin, 2023).

Los microorganismos como fuentes dinamizadoras de Fósforo.

Cuando el pH se encuentra entre 4,0 y 6,0, predomina el ion H_2PO_4^- ; en rangos de 6,5 a 7,5, el (Pi) El fósforo (P) es un elemento esencial para el crecimiento vegetal, pero su disponibilidad en el suelo depende de diversos factores fisicoquímicos y biológicos. En la solución del suelo, las formas iónicas del fósforo inorgánico (Pi) varían según el nivel de pH. A valores entre 4,0 y 6,0, predomina el ion H_2PO_4^- ; entre 6,5 y 7,5, el Pi se encuentra principalmente como H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} , mientras que en suelos alcalinos (pH de 8,0 a 10,0) predomina HPO_4^{2-} . En suelos muy ácidos ($\text{pH} \leq 3,0$), el fósforo está presente como H_3PO_4 , una forma altamente reactiva que promueve la fijación rápida del fosfato mediante reacciones de precipitación, generando compuestos insolubles de Al-P y Fe-P no asimilables por las plantas (Arai & Sparks, 2007).

Estas reacciones explican la baja eficiencia de los fertilizantes fosfatados, la cual puede ser tan solo del 5 al 10 % en condiciones extremas. Por su parte, la fracción de fósforo orgánico (Po) suele representar al menos el 30 % del fósforo total del suelo, aunque en algunos casos puede alcanzar hasta el 80 % (Richardson, 2007).

Según Pierzynski et al. (2005), menciona que la disponibilidad del fósforo en el suelo depende de tres procesos fundamentales:

- a) Disolución y precipitación, que regulan el equilibrio mineral.
- b) Adsorción y desorción, relacionadas con las interacciones entre el fósforo soluble y las superficies sólidas del suelo.
- c) Mineralización e inmovilización, que comprenden las transformaciones biológicas entre las formas orgánicas e inorgánicas del fósforo.

Ante la limitada disponibilidad natural de fósforo, las plantas han desarrollado adaptaciones evolutivas, morfológicas, bioquímicas y simbióticas, que mejoran la absorción y el aprovechamiento del Pi (Lambers et al., 2011). Una de las estrategias más importantes es la asociación simbiótica entre las raíces y microorganismos del suelo, capaces de mineralizar o solubilizar las fuentes de fósforo orgánico e inorgánico, aumentando así su disponibilidad.

La solubilización del fósforo es un proceso mediante el cual se revierten las reacciones de precipitación, liberando el fósforo hacia la solución del suelo. Este fenómeno ocurre principalmente gracias a la actividad metabólica de microorganismos y raíces vegetales. El papel de las bacterias en esta función se reconoció hace más de un siglo (Goldstein & Krishnaraj, 2007), y Gerretsen (1948) recopiló los primeros avances sobre el tema. Posteriormente, numerosos estudios demostraron la capacidad solubilizadora de fosfatos de diversas especies bacterianas como *Erwinia*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*, *Klebsiella*, *Burkholderia*, *Serratia*, *Achromobacter*, *Agrobacterium*, *Micrococcus*, *Aerobacter*, *Flavobacterium*, *Enterobacter*, *Arthrobacter*, *Rhodobacter* y *Pantotea*, así como de hongos como *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma* y *Fusarium* (Khan et al., 2010).

Los microorganismos del suelo desempeñan un papel crucial en los procesos de mineralización y solubilización del fósforo, al transformar los fosfatos naturales insolubles en formas asimilables por las plantas, contribuyendo de manera directa a su nutrición (Mendes & Reis Junior, 2003). Numerosas investigaciones han evidenciado que la inoculación de microorganismos solubilizadores de fosfatos puede mejorar significativamente la eficiencia del

fósforo en los cultivos, aunque su desempeño depende de las condiciones edáficas que regulan su actividad biológica (Barroti & Nahas, 2000).

Estos microorganismos intervienen activamente en los tres componentes principales del ciclo del fósforo en el suelo disolución precipitación, adsorción, desorción y mineralización e inmovilización, por lo que su presencia resulta determinante en la disponibilidad de este elemento (Cepeda et al., 2005).

Entre los organismos más destacados Richardson (2009), menciona que se encuentran los hongos micorrícicos, ampliamente reconocidos por su influencia positiva en la solubilización y absorción del fósforo. No obstante, también existe una gran diversidad microbiana no micorrícica con la misma capacidad de incrementar la eficiencia de adquisición de fósforo por las plantas mediante distintos mecanismos:

1. Estimulación del crecimiento radical, ya sea a través de asociaciones simbióticas (como las micorrizas) o mediante la producción de fitohormonas que promueven la formación de raíces laterales y pelos radicales.
2. Modificación del equilibrio sorción–desorción, que aumenta la disponibilidad de iones de ortofosfato en la solución del suelo y mejora la movilidad del fósforo orgánico mediante el reciclaje microbiano.
3. Activación de procesos metabólicos solubilizadores y mineralizadores, entre ellos la liberación de protones y aniones orgánicos, la producción de sideróforos y la secreción de enzimas fosfatasas y celulolíticas, necesarias para degradar compuestos orgánicos que contienen fósforo (Richardson & Simpson, 2011).

En conjunto, estas interacciones demuestran que los microorganismos del suelo son agentes dinamizadores del ciclo del fósforo, esenciales para promover una agricultura más sostenible y eficiente en el uso de nutrientes.

Trichoderma spp.

Los hongos del género *Trichoderma spp.* descienden del siguiente linaje: dominio Eukaryota, supergrupo Opisthokonta, reino Fungi, superdivisión Dikarya, subreino Eumycota, división Ascomycota, subdivisión saccharomyceta, subdivisión Pezizomycotina, subdivisión leotiomyceta, clase Sordariomycetes, suborden Hypocreomycetidae y familia Hypocreaceae. Son saprofitos, presentan micelio con septos simples, se reproducen asexualmente, son haploides, y su pared está compuesta por quitina y glucano (CompanioniGonzález et al., 2019). Al inicio del uso de *Trichoderma spp.* se identificaban unas 30 especies; actualmente, con la biotecnología molecular, se distinguen más de 100 especies (Torres de la Cruz et al., 2015).

Trichoderma spp. son comunes en la corteza en descomposición y en la superficie de las raíces de las plantas (Carreras et al., 2012). Su éxito en el ecosistema como descomponedor natural es gracias a su alta capacidad enzimática para degradar sustratos (Companion-González et al., 2019), su capacidad acelerada de crecimiento, su capacidad de absorción de nutrientes, sobrevivencia en suelos con diferente condición ambiental adversa y cantidad de materia orgánica, así como por ser anaerobias facultativas y tener una tendencia destructiva sobre microorganismos fitopatógenos. Todo lo anterior les permite mostrar una mayor plasticidad ecológica (Infante et al., 2009).

Estos hongos están integrados por especies y cepas con diferentes funciones que se pueden encontrar en una amplia variedad de nichos ecológicos. Tienen bajos requerimientos nutricionales, y para su crecimiento necesitan un rango de temperatura de 25-30 °C (Sandle, 2014). El clima afecta su distribución, por lo que la especie *Trichoderma hamatum B.* es tolerante al exceso de humedad, *Trichoderma harzianum R.* se ve favorecida en climas cálidos y *Trichoderma viride P.* prefiere las temperaturas frías (Sarhy et al., 2000).

Como control biológico, los hongos del género *Trichoderma* están presentes en el suelo, y debido a sus acciones antagonistas actúan como parásitos, que han demostrado su efectividad contra patógenos responsables de la infección de raíces y la incidencia de pudrición en las plantas. Estas acciones se pueden clasificar como: micoparasitismo (con la secreción de enzimas hidrolíticas que actúan sobre la pared celular del huésped), antibiosis (con la síntesis de metabolitos secundarios antimicrobiales), competencia por espacio o nutrientes (con la producción de metabolitos que interfieren con el desarrollo de plagas) y simbiosis (al favorecer el crecimiento y la inducción de resistencia a enfermedades y estreses abióticos en las plantas con las que conviven). *Trichoderma spp.* descomponen la materia orgánica, por lo que son considerados oportunistas ambientales, y presentan una amplia distribución geográfica, un rápido crecimiento que favorece la colonización de sus hábitats y una alta capacidad de parasitar o depredar a otros hongos. Además, estos hongos pueden crecer en suelos sin cultivos, así como suprimir estructuras y crear resistencia a patógenos existentes, por lo que pueden actuar no solo de forma curativa, sino también para prevenir enfermedades (Nascimento et al., 2022). Toman nutrientes de los hongos que parasitan y del material orgánico disponible en el suelo, lo cual favorece su descomposición y la proliferación del hongo (Agamez et al., 2008).

Son hongos protectores y promotores de crecimiento que se asocian a las raíces de las plantas. Estas reciben protección en el sistema radicular y extienden la superficie de exploración para llegar a nutrientes que se mueven de forma lenta o son inmóviles como el fósforo (Hernández et al., 2019). Ello permite mejorar la nutrición vegetal debido principalmente a la solubilización de este nutriente que sintetiza el ácido indol-acético (AIA) (Prasad et al., 2020)

Mediante sus diversos mecanismos de acción, estos microorganismos posibilitan la tolerancia al estrés por parte de la planta, la solubilización y absorción de nutrientes inorgánicos y, por tanto, la estimulación del crecimiento vegetal (Martínez et al., 2013).

Micorrizas

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) pertenecen al filo Glomeromycota, dentro del dominio Eukaryota y del reino Fungi, en el subreino Dikarya. Estos organismos establecen asociaciones simbióticas mutualistas con más del 80 % de las especies vegetales terrestres, al colonizar sus raíces y formar estructuras especializadas: arbuscúlos y vesículas que facilitan el intercambio de nutrientes entre el hongo y la planta (Smith & Read, 2022).

Los HMA son biotróficos obligados, es decir, necesitan del hospedero vegetal para completar su ciclo vital. Sus hifas extraradicales se expanden en el suelo, aumentando la capacidad de absorción de agua y nutrientes como fósforo (P), nitrógeno (N), zinc (Zn) y cobre (Cu). A cambio, la planta les proporciona compuestos carbonados (azúcares y lípidos) derivados del proceso fotosintético (Pérez et al., 2021).

Gracias a su amplia plasticidad ecológica, estos hongos pueden adaptarse a una gran variedad de condiciones edáficas y climática ya que, estas se desarrollan preferentemente en suelos con pH entre 5.5 y 7.5, temperaturas de 20 a 30 °C y buena aireación, aunque algunas especies toleran ambientes más secos o con salinidad moderada (Ruiz et al., 2023). Además, los HMA contribuyen significativamente a la estructura y estabilidad del suelo, ya que secretan glomalina, una glicoproteína que favorece la formación de agregados estables, mejora la retención de humedad y aumenta la resistencia a la erosión (Singh et al., 2020).

Desde una perspectiva funcional, estos hongos actúan también en el control biológico de patógenos, al competir por espacio y nutrientes e inducir respuestas de defensa sistémica en las plantas hospedadoras. Asimismo, estimulan la síntesis de fitohormonas como el ácido

indolacético (AIA) y las citoquininas, promoviendo un desarrollo radicular más ramificado y eficiente en la captación de nutrientes (Ferrol et al., 2021).

En el contexto de una agricultura sostenible, la aplicación de inoculantes micorrízicos ha mostrado efectos positivos al incrementar el rendimiento de los cultivos, mejorar la eficiencia del uso del fósforo y mitigar los efectos del estrés abiótico, incluyendo la sequía, la salinidad y la presencia de metales pesados (González et al., 2024). Debido a estos beneficios, los HMA son considerados biofertilizantes naturales y agentes ecológicos clave dentro de la agricultura regenerativa, desempeñando además un papel importante en la mitigación del cambio climático mediante el secuestro de carbono en el suelo.

Evaluación del fósforo absorbido por el método DVS

La Digestión Vía Seca (DVS) es un método clásico de preparación de muestras que consiste en la incineración controlada del material vegetal en una mufla hasta obtener cenizas blancas o grisáceas, las cuales posteriormente se solubilizan en un ácido para su análisis químico. Según Mendoza et al. (2014), la DVS implica “la calcinación de la muestra a temperaturas entre 450 y 550 °C hasta la eliminación completa de la materia orgánica”, obteniendo así un residuo mineral apto para la cuantificación de nutrientes. Este método tiene como objetivo descomponer la matriz orgánica y liberar los elementos minerales en una forma estable y medible, permitiendo su determinación por técnicas como UV-VIS, AES o FAAS.

Metodología/Técnicas/Diseño**Ubicación del área experimental****Ubicación política**

País:	Ecuador
Provincia:	Santo Domingo de los Tsáchilas
Cantón:	Santo Domingo
Parroquia:	Luz de América
Dirección:	Vía Santo Domingo-Quevedo Km 2

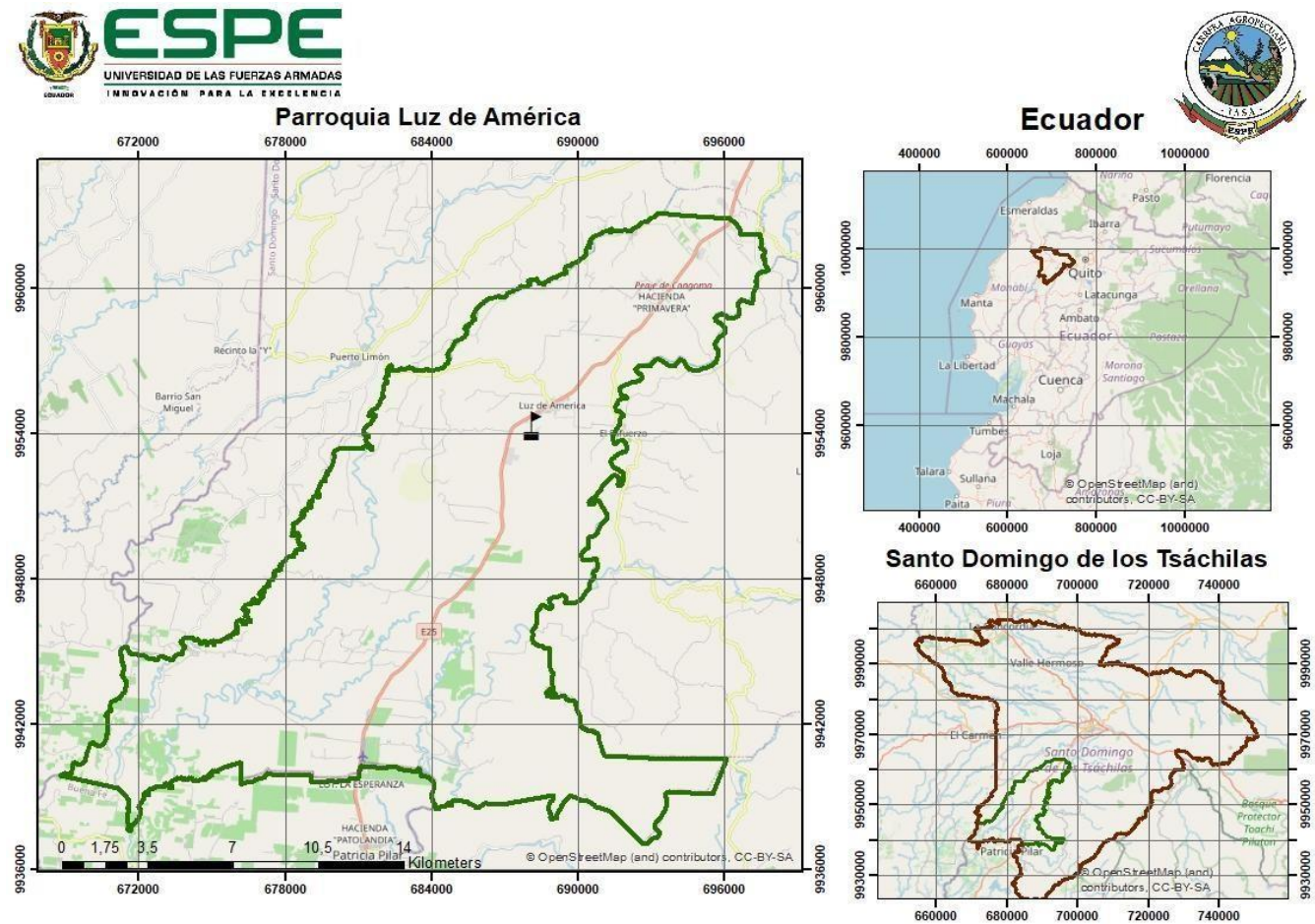
Ubicación Geográfica

La presente investigación se llevó a cabo en la Hacienda Zoila Luz, ubicada dentro de las instalaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sede Santo Domingo, enfocándose particularmente en el área dedicada al cultivo de pastos y forrajes.

Coordenada X:	688168
Coordenada Y:	9954338
Zona:	17 M

Figura 2.

Mapa de localización del ensayo experimental.



Nota: Ubicación del IASA II campus de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

Ubicación Ecológica

Tabla 2.
Ubicación ecológica.

Ubicación Ecológica	
Zona de vida:	Bosque Húmedo Tropical, (bh-T)
Temperatura:	24-26°C
Humedad:	89%

Pluviosidad:	2980 mm anuales
Altitud:	276 m.s.n.m.
Heliofanía:	660 horas/luz/año

Tabla 3.

Preparación, delimitación y surcado de la parcela demostrativa

Materiales	Equipo
Azadón	GPS
Machete	Celular
Pala	
Piola	
Estacas	
Cinta métrica	
Caracas	
Cava hoyos manual	
Alambre	
Grapas	
Martillo	

Tabla 4.

Instalación del sistema de riego por aspersión

Materiales	Equipo	Insumos
Manguera	Bomba 1 hp	Agua
Tanque de 2000 litros	Breaker 2 polos (16 amperios)	
Aspersores	Programador reloj digital 110 v	
Uniones	Gabinete metálico (30*15*20)cm	

Estacas	Cable de luz
Teflón	Contactador de dos polos 18-110 v
Amarras	
Abrazaderas	
Uniones T	
Adaptadores	

Tabla 5.*Fertilización, inóculos y siembra de ají*

Materiales	Equipo	Insumos
Regaderas	Balanza	Agua
Tanque de 200 L		Sustrato con Micorrizas (Fungifert)
Cava hoyos manual		Sustrato con <i>Trichodermas</i> (TrichoBio)
Baldes		Sustrato normal
Tarrinas		Melaza
		Urea
		DAP
		Muriato de Potasio
		Plántulas de ají

Tabla 6.*Inóculos utilizados en los tratamientos*

Materiales	Composición
<i>Trichoderma spp.</i> (TrichoBio)	<i>Trichoderma yunnanense</i>

Micorriza (Fungifert)

Micorrizas arbusculares

Tabla 7.*Control de malezas*

Materiales	Equipo	Insumos
Dosificador	Bomba de fumigar	Glufosinato
Machete		Glifosato
		Agua

Tabla 8.*Control fitosanitario*

Materiales	Equipo	Insumos
Dosificador	Bomba de fumigar	Acetamiprid
	Balanza	Abamectina
		Fosetil aluminio
		Regulador de pH y fijador
		Agua

Tabla 9.*Nutrición foliar.*

Materiales	Equipo	Insumos
Dosificador	Bomba de fumigar	Micronutrientes
	Balanza	Algas marinas
		Regulador de pH y fijador
		Agua

Métodos.

Establecimiento del ensayo.

El área experimental que se utilizó era un cultivo de pasto de corte en el cual se realizó la limpieza manual para proceder al arado y surcado, obteniendo así un suelo más suave y mullido.

Los surcos se realizaron con azadón teniendo un ancho de 0,50 m y su distancia entre hileras fué de 0,75 m.

Delimitación de la Unidad Experimental.

Para delimitar la unidades experimentales se realizó un croquis en el cual se tomó en cuenta las medidas exactas del área a utilizar, el área total del estudio es de 180 m² distribuidos de la siguiente manera, 9 m de ancho y 20 m de largo, el espacio total tiene 20 parcelas que tienen una medida de 3,25 m x 1,5 m, cada parcela está delimitada por una fila que actúa como efecto borde.

Una vez identificada el área a utilizar se realizó el cercado vivo con caraca y tres líneas de alambre, esto se hizo con la finalidad de evitar problemas ocasionados por el ingreso de animales hacia las parcelas.

Instalación de sistema de riego.

Se estableció un sistema de riego por aspersión, en el que se utilizó un tanque de 2000 L, una bomba de un hp, una instalación eléctrica para poder activar el sistema, mangueras, llaves de paso y aspersores que están a una distancia de 5,5 m y que cubren un radio de 6 m.

Inoculación de tratamientos.

Para empezar con el ensayo se inocularon los microorganismos por separado en humus de lombriz, una vez inoculado cada tratamiento con melaza (*trichoderma*, micorrizas, *trichoderma* + micorrizas) se colocaron en una cámara térmica que ayudó a crear las condiciones ideales de propagación y desarrollo.

Aplicación de *Trichodermas*.

Se utilizó un inóculo de *Trichoderma* que contiene $5,5 \times 10^9$ UFC/ g, esto se mezcló con melaza para activar estos microorganismos, posteriormente se incorporó en la materia orgánica y se llevó a la cámara térmica por 2 semanas.

Aplicación de Micorrizas.

Se utilizó un sustrato enriquecido con esporas viables de varios géneros de hongos micorrizógenos arbusculares, se aplicó directamente al humus y se llevó a la cámara térmica por 2 semanas.

Hoyado, aplicación de humus con tratamientos, fertilizante y siembra.

El hoyado se realizó cada 0,65m con un cava hoyos manual dejando una profundidad de 15 cm, previo a la siembra se realizó la fertilización según el análisis de suelos colocando 30 gramos por planta, luego se colocó el humus con cada tratamiento correspondiente, *trichodermas*, micorrizas, *trichodermas* + micorrizas y humus sin inocular, una vez adecuado se procedió a la siembra de las plántulas de ají con una densidad de 0,75 m x 0,65 m, dejando un total de 18 plantas por parcela de las cuales se evaluaron 12, el ensayo es realizado con fines investigativos motivo por el cual se incrementó la densidad de siembra para reducir el error experimental.

Control de malezas.

El control de malezas dentro de la parcela se realizó manualmente cada 15 días con el objetivo de reducir la competencia directa durante las primeras etapas del cultivo, en los alrededores se aplicó un control químico con herbicidas (Paraquat y Glifosato) para mantener el área experimental limpia y libre de insectos que puedan hospedarse dentro de la maleza.

Fertilización.

El plan de fertilización se llevó a cabo basándose en un análisis de suelo y el requerimiento del cultivo, se dividió en tres aplicaciones que van según la etapa fenológica de la planta.

Tabla 10.

Plan de fertilización.

Fertilizante	Cantidad	Método de aplicación	N° de aplicación
DAP +Urea+KNO ₃	11,80 kg	30 gr/planta	1ra aplicación-día 0
Urea+KNO ₃	4,52 kg	11 gr/planta	2da aplicación- día 30
Microelementos	300 gr	Aplicación foliar	3ra aplicación- día 60

Nota: La fertilización se realizó según el requerimiento del cultivo y el análisis de suelo.

Manejo fitosanitario.

El manejo se realizó basándose en ataques observados en el cultivo y se controló únicamente con productos permitidos por Proají, en la etapa inicial las plantas se vieron afectadas por pulgones (*Aphis gossypii*) y arañita roja (*Tetranychus urticae*) las cuales generaron daños en el follaje, una vez identificada la plaga se procedió a elegir el ingrediente

activo ideal para controlar al agente causal, en este caso se utilizó abamectina + acetamiprid, con está aplicación se logró un manejo efectivo y oportuno.

Toma de datos en campo.

La toma de datos se realizó a partir de los 21 días de establecimiento del cultivo, cada toma de datos se realizó con un intervalo de 15 días, en las tomas de datos se evaluó variables como: altura, número de hojas.

En las últimas etapas del cultivo se tomó en cuenta los días a la floración y se realizó una poda para igualar el cultivo, luego se tomó datos de flores y frutos por tratamiento.

Respecto a las raíces también se realizó un cateo en el cual identificamos cuál fué el tratamiento con mejor sistema radicular.

Análisis de laboratorio.

Para asegurarnos de que el sustrato está inoculado con los tratamientos se realizaron diluciones en el laboratorio y se procedió a sembrar cada tratamiento en cajas petri, luego se observó a través del microscopio que las estructuras fueran del microorganismo aplicado, en este caso *trichoderma* se pudo identificar por su coloración y estructuras.

En el caso de micorrizas se realizó un método distinto para poder observar que las estructuras colonizaron las raíces, para esto se realizó el aclarado de la raíz con KOH al 10% y tinción con azul de metileno, posteriormente se observó en el microscopio y se comprobó que las estructuras de las micorrizas estaban presentes dentro de la raíz.

Contenido nutricional a nivel radicular.

Estos análisis se realizaron por la empresa Agrarproject utilizando el método de incineración seca para conocer la cantidad de nutrientes contenidos en la raíz, en especial para identificar la solubilidad del fósforo respecto a los tratamientos aplicados.

Análisis de la calidad físico-química del fruto.

En los análisis se tomó en cuenta parámetros como dureza, pH y coloración de los frutos maduros, para conocer el nivel de capsaicina del fruto se realizó el método de laboratorio por extracción Soxhlet donde posteriormente se determinó la concentración pesando el extracto concentrado.

Diseño.

Tabla 11.

Tratamientos aplicados en cada repetición.

Tratamientos	Simbología
<i>Trichoderma</i>	T1
Micorriza	T2
<i>Trichoderma</i> + Micorriza	T3
Testigo	T4

Diseño experimental

El diseño experimental aplicado en este estudio fué un diseño completamente al azar (DBCA) donde se evaluó 4 tratamientos en 5 bloques, lo cual resultó en un total de 20 unidades experimentales para evaluación.

Análisis estadístico

Tabla 12.
Esquema de ADEVA

FV	Fórmula	GL
Bloque	b-1	4
Variedad	A-1	3
Error	GLTo – GLb – GLB	12
Total	(n-1)	19

Análisis funcional.

Para analizar las diferencias significativas se utilizó la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5%.

Características: Área experimental.

Tabla 13.

Características del Área Experimental

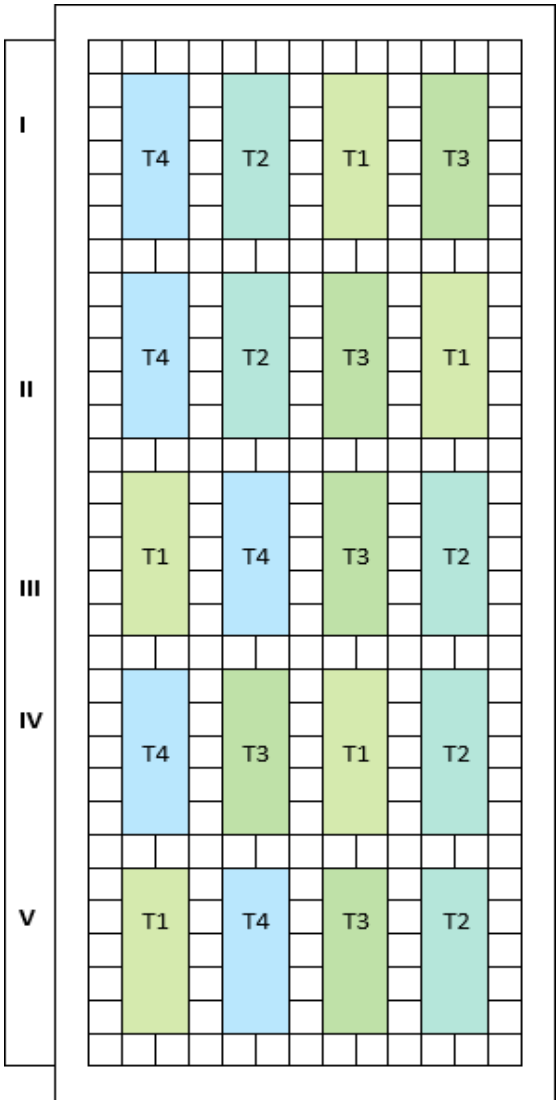
Características generales.	
Área experimental neta.	180 m ²
Número de Unidades experimentales (UE).	20
Forma de la Unidad experimental.	Rectangular
Ancho UE.	1.5 m
Largo UE.	3.25 m
Área UE.	4.87 m ²

Variables a evaluar.

- Altura.
- Número de hojas.
- Número de flores.
- Número de frutos.
- Peso del fruto.
- Absorción de fósforo a nivel radicular.
- Tamaño de la raíz.

Croquis

Figura 3.
Croquis de distribución de las unidades experimentales.



Resultados.

Análisis de ANOVA para la variable altura y número de hojas a los 21 días después de la siembra.

Altura.

Tabla 14.

Análisis de varianza para la altura variable a los 21 días de la siembra.

Factor de variación.	Grados de libertad.	Suma de cuadrados.	Cuadrado medio.	F	p-valor
TRATAMIENTO	3	4,43	1,48	2,13	0,1497
BLOQUE	4	6,35	1,59	2,29	0,1197
Error	12	8,32	0,69		
Total	19	19,1			

Nota: Para la variable altura a los 21 días, el coeficiente de variación fue de 5,92 %.

En la tabla 14 se presenta el análisis de varianza para la variable altura de la planta a los 21 días después de la siembra. Los resultados indican que no existen diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$) para el factor Tratamiento ($p=0,1497$) ni para el factor Bloque ($p=0,1197$). Lo que indica que en esta etapa fenológica los tratamientos no influyeron en la altura, comportándose de forma homogénea entre las plantas con los diferentes tratamientos.

Número de hojas.

Tabla 15.

Análisis de varianza para la variable del número de hojas a los 21 días de la siembra.

Factor de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
TRATAMIENTO	3	3,58	1,19	5,67	0,0118*
BLOQUE	4	0,98	0,24	1,17	0,3736

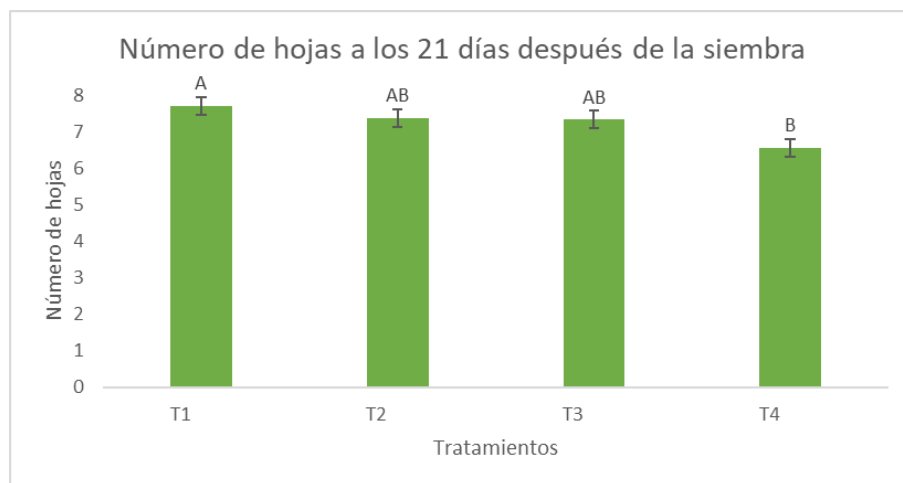
Error	12	2,52	0,21
Total	19	7,08	

Nota: El coeficiente de variación (CV) para esta variable fue del 6,31 %.

En la Tabla 15 se presenta el análisis de varianza para la variable número de hojas a los 21 días después de la siembra. Los resultados indican que existen diferencias estadísticas significativas para el factor Tratamiento ($p = 0,0118 < 0,05$). Por el contrario, el factor Bloque no presentó diferencias significativas ($p = 0,3736$).

Figura 4.

Comparación de medias mediante el Test de Tukey para la interacción tratamiento en la variable número de hojas a los 21 días de la siembra.



En la Figura 4 se presenta la comparación de medias de la variable número de hojas a los 21 días después de la siembra. Los resultados indican que el tratamiento T1 (*Trichoderma*) registró la mayor media (7,73 hojas), mostrando diferencia estadísticamente significativa respecto al tratamiento T4. Por otro lado, los tratamientos T2 y T3 presentaron valores intermedios, sin diferencias significativas con T1 y T4, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Tabla 16.

Análisis de medias para la variable altura y número de hojas a los 21 días de la siembra.

Factor	Designación	Medias Altura	Medias N° Hojas
TRATAMIENTO	T1 (<i>Trichoderma</i>)	13,58 ^A	7,73 ^A
	T2 (Micorriza)	13,75 ^A	7,4 ^{AB}
	T3 (<i>Trichoderma</i> + Micorriza)	14,8 ^A	7,35 ^{AB}
	T4 (Testigo)	14,13 ^A	6,58 ^B

En la Tabla 16 se presentan las medias correspondientes a las variables altura de planta y número de hojas evaluadas a los 21 días después de la siembra. Para la variable altura de planta, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, ya que todos pertenecen al mismo grupo estadístico (A), de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

En cuanto la variable número de hojas sí mostró variaciones importantes. El tratamiento T1 (*Trichoderma*) destacó con el mejor desempeño, alcanzando una media de 7,73 hojas, lo cual lo diferencia estadísticamente del testigo T4, que presentó el valor más bajo (6,58 hojas). Entre estos dos extremos, los tratamientos T2 (Micorriza) y T3 (*Trichoderma* + Micorriza) mostraron valores intermedios que, estadísticamente, no difieren ni del mejor ni del peor tratamiento.

Análisis de ANOVA para la variable altura y número de hojas a los 35 días después de la siembra.

Altura.

Tabla 17.

Análisis de varianza para la variable altura a los 35 días de la siembra.

Factor de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
TRATAMIENTO	3	20,36	6,79	4,24	0,0292
BLOQUE	4	6,55	1,64	1,02	0,4342
Error	12	19,19	1,6		
Total	19	46,09			

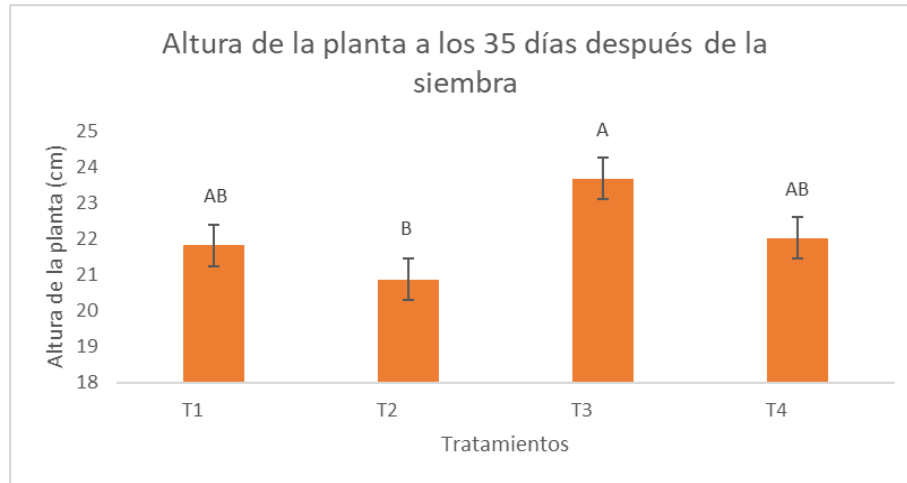
Nota: * Significativo ($p < 0,05$). CV = 5,72 %, lo que indica que existe homogeneidad en los datos analizados.

La Tabla 17 presenta el ANOVA para la altura a los 35 días, encontramos que a los 35 días los tratamientos ya marcaban una diferencia clara. El análisis estadístico arrojó un valor de $p < 0,05$, lo que nos indica que la altura de las plantas varió significativamente dependiendo del tratamiento aplicado.

No obstante, esta variación no se debió al terreno, ya que el factor (bloque) no mostró diferencias significativas. En otras palabras, el suelo fue homogéneo para todos. Además, los datos son muy consistentes: el bajo Coeficiente de Variación (5,72 %) nos confirma que hubo muy poco error en las mediciones, dándonos gran confianza en estos resultados.

Figura 5.

Efecto de la interacción de tratamientos en la altura del cultivo (35 dds): Comparación de medias por Tukey.



En la Figura 5 se presenta la comparación de medias de la variable altura a los 35 días después de la siembra. Los resultados indican que el tratamiento T3 (*Trichoderma* + Micorriza) registró la mayor media (23,68 cm), mostrando diferencia estadísticamente significativa respecto al tratamiento T2. Por otro lado, los tratamientos T1 y T4 presentaron valores intermedios, sin diferencias significativas con T1 y T4, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Número de hojas

Tabla 18.

Análisis de varianza para la variable número de hojas a los 35 días de la siembra.

Factor de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
TRATAMIENTO	3	3,45	1,15	2,72	0,0908
BLOQUE	4	0,44	0,11	0,26	0,8987
Error	12	5,07	0,42		

Total	19	8,95
--------------	----	------

Nota: Se obtuvo un coeficiente de variación del 5,33 %, indicando una alta homogeneidad en los datos experimentales.

La Tabla 18 presenta el ANOVA para la variable número de hojas a los 35 días, los resultados indican que no existen diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$) para el factor Tratamiento ($p=0,0908$), así como tampoco para el factor Bloque ($p=0,898$). Lo que indica que en esta etapa fenológica los tratamientos no influyeron en la altura, comportándose de forma homogénea entre las plantas con los diferentes tratamientos.

Tabla 19.

Análisis de medias para la variable altura y número de hojas a los 35 días de la siembra.

Factor	Designación	Medias Altura	Medias N° Hojas
TRATAMIENTO	T1 (<i>Trichoderma</i>)	21,83 ^{AB}	12,50 ^A
	T2 (Micorriza)	20,88 ^B	11,85 ^A
	T3 (<i>Trichoderma</i> + Micorriza)	23,68 ^A	12,70 ^A
	T4 (Testigo)	22,03 ^{AB}	11,73 ^A

En la Tabla 19 se resumen las medias para las variables altura de planta y número de hojas a los 35 días post-siembra. En el caso de la altura, se detectaron diferencias estadísticas significativas: el tratamiento T3 (*Trichoderma* + Micorriza) alcanzó el mayor porte (23,68 cm), diferenciándose del T2 (Micorriza) que obtuvo el valor más bajo (20,88 cm). Por su parte, los tratamientos T1 y T4 (Testigo) mostraron un comportamiento intermedio (grupo AB), sin diferenciarse estadísticamente de los extremos.

En contraste, para la variable número de hojas, el análisis no arrojó diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. Todos se ubicaron dentro del mismo grupo

estadístico (A) según la prueba de Tukey ($p < 0,05$), con medias que oscilaron entre 11,73 y 12,70 hojas.

Análisis de ANOVA para la variable altura y número de hojas a los 49 días después de la siembra.

Altura.

Tabla 20.

Análisis de varianza para la variable altura a los 49 días de la siembra.

Factor de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
TRATAMIENTO	3	18,72	6,24	1,2	0,3501
BLOQUE	4	29,56	7,39	1,43	0,2843
Error	12	62,18	5,18		
Total	19	110,46			

Nota: El coeficiente de variación de 5,97% indica una alta precisión experimental y una baja dispersión de los datos obtenidos.

En la tabla 20 se presenta el análisis estadístico de la variable altura a los 49 días después de la siembra, los resultados indican que no existen diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$) para el factor Tratamiento ($p=0,3501$) y tampoco para el factor Bloque ($p=0,2843$). Sin embargo, es necesario destacar que durante esta etapa se registró un ataque de insecto trozador, factor que incidió directamente en el desarrollo vertical de las plantas y se evidenció en los promedios de altura obtenidos.

Análisis de ANOVA para la variable altura a los 63 días después de la siembra.

Altura.

Tabla 21.

Análisis de varianza para la variable altura a los 63 días de la siembra.

Factor de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
TRATAMIENTO	366,23	3	122,08	12,03	0,0006
BLOQUE	97,42	4	24,36	2,4	0,1078
Error	121,77	12	10,15		
Total	585,42	19			

Nota: El coeficiente de variación de 5,92% indica una alta precisión experimental y una baja dispersión de los datos.

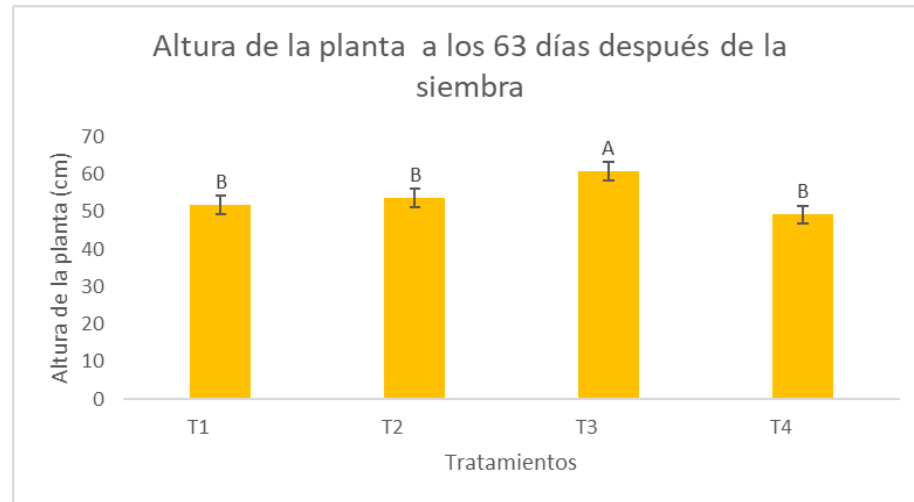
En la Tabla 21 se presenta el análisis de varianza para la altura de planta a los 63 días, donde se evidencia un impacto de los tratamientos sobre la altura de las plantas.

Específicamente, los resultados mostraron diferencias estadísticas altamente significativas ($p = 0,0006 < 0,01$), lo cual confirma la efectividad de las aplicaciones en esta etapa avanzada del desarrollo.

Por otro lado, al evaluar el factor Bloque, no se encontró evidencia de variabilidad significativa ($p = 0,1078$). Esto sugiere que las condiciones espaciales del experimento fueron homogéneas y no interfirieron con los efectos observados.

Figura 6.

Comparación de medias mediante el Test de Tukey para la interacción tratamiento en la variable altura de la planta a los 63 días de la siembra.



En la Figura 6 se presenta la comparación de medias de la variable altura a los 63 días después de la siembra. Los resultados indican que el tratamiento T3 (*Trichoderma* + Micorriza) registró la mayor media (60,75 cm), mostrando diferencia estadísticamente significativa respecto a los tratamientos T1, T2 y T4. Por otro lado, los tratamientos T1, T2 y T4 presentaron valores inferiores y estadísticamente similares entre sí, conformando un mismo grupo homogéneo (B) de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Análisis de ANOVA para la variable número de flores a los 93 días después de la siembra.

Número de flores.

Tabla 22.

Análisis de varianza para la variable número de flores a los 93 días de la siembra.

Factor de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
---------------------	--------------------	-------------------	----------------	---	---------

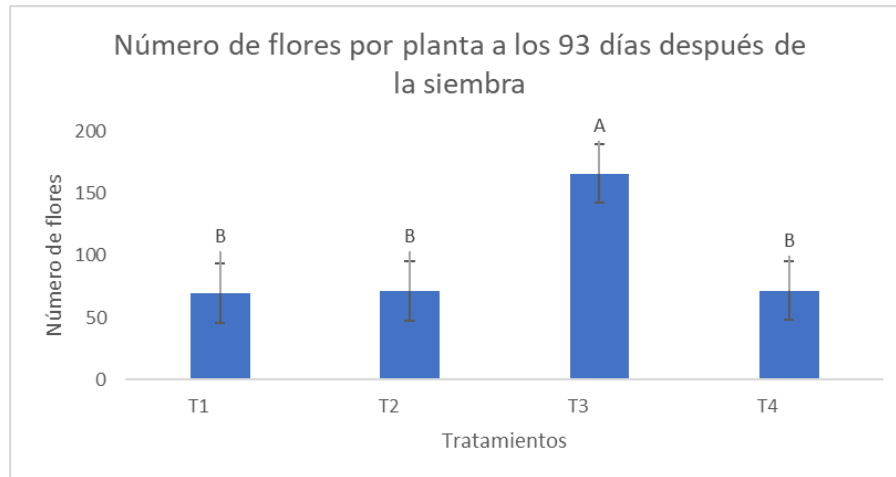
TRATAMIENTO	33712,6	3	11237,53	17,99	0,0001
BLOQUE	1886,5	4	471,63	0,76	0,5738
Error	7495,9	12	624,66		
Total	43095	19			

Nota: El coeficiente de variación de 26,45% indica una dispersión de datos moderada, considerada aceptable para variables de conteo biológico.

En la Tabla 22 se presenta el análisis de varianza para la variable número de flores evaluada a los 93 días después de la siembra. Los resultados indican que existen diferencias estadísticas altamente significativas ($p = 0,0001 < 0,01$) para el factor Tratamiento, lo que demuestra que los insumos biológicos aplicados tuvieron un efecto determinante en la capacidad reproductiva del cultivo. Por otro lado, el factor Bloque no presentó significancia estadística ($p = 0,5738$), lo que confirma que las condiciones ambientales dentro del lote experimental se mantuvieron uniformes. Aunque el coeficiente de variación (26,45 %) es más elevado que en variables vegetativas, se sitúa dentro de los rangos esperados para variables de conteo floral debido a la variabilidad intrínseca de la floración en campo.

Figura 7.

Comparación de medias mediante el Test de Tukey para la interacción tratamiento en la variable número de flores por planta a los 93 días de la siembra.



En la Figura 7 se presenta la comparación de medias de la variable número de flores por planta a los 93 días después de la siembra. Los resultados indican que el tratamiento T3 (*Trichoderma* + Micorriza) registró la mayor media (aprox. 165 flores), mostrando una diferencia estadísticamente significativa respecto a todos los demás tratamientos evaluados. Por otro lado, los tratamientos T1, T2 y T4 presentaron los valores más bajos y se comportaron de manera similar entre sí, sin diferencias significativas entre ellos, conformando un segundo grupo estadístico (B) de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Número de frutos.

Tabla 23.

Análisis de varianza para la variable número de frutos a los 126 días de la siembra.

Factor de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
TRATAMIENTO	3	10436,95	3478,98	19,95	0,0001

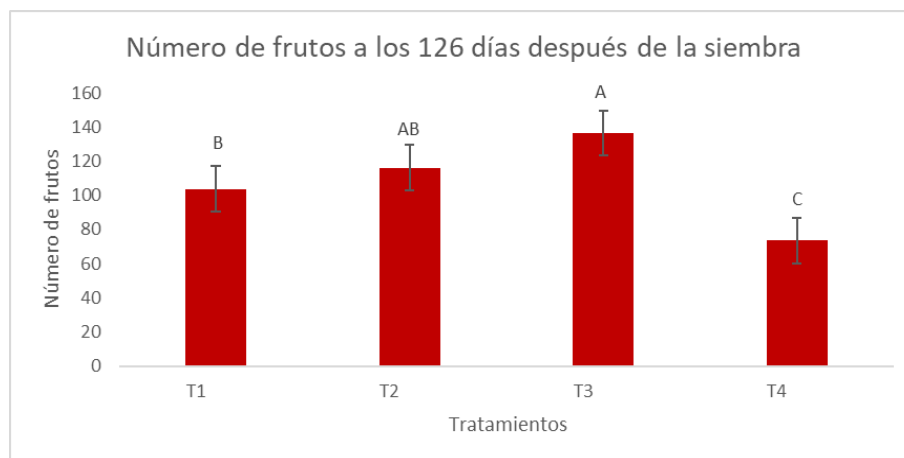
BLOQUE	4	1155,7	288,93	1,66	0,224
	12		174,36		
Error		2092,3			
	19				
Total		13684,95			

Nota. El coeficiente de variación de 12,29% refleja una variabilidad aceptable y una adecuada consistencia en los datos obtenidos para esta variable.

La Tabla 23 presenta el ANOVA para la variable número de frutos a los 126 días de la siembra; los resultados indican que existen diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0,01$) para el factor Tratamiento ($p=0,0001$), mientras que para el factor Bloque no se detectaron diferencias significativas ($p=0,224$). Esto demuestra que, en la etapa de cosecha, los tratamientos influyeron de manera determinante en la productividad, generando una respuesta diferenciada en la cantidad de frutos obtenidos.

Figura 8.

Comparación de medias mediante el Test de Tukey para la interacción tratamiento en la variable número de frutos a los 126 días de la siembra.



En la Figura 8 se presenta la comparación de medias de la variable número de frutos a los 126 días después de la siembra. Los resultados indican que el tratamiento T3 (*Trichoderma*

+ Micorriza) registró la mayor media (137,00 frutos), mostrando una diferencia estadísticamente significativa respecto a los tratamientos T1 y T4. Por otro lado, el tratamiento T2 presentó un comportamiento intermedio (116,40 frutos), sin diferencias significativas con el tratamiento superior (T3) ni con el T1. Finalmente, el tratamiento T4 (Testigo) presentó el menor rendimiento promedio (73,40 frutos), diferenciándose significativamente de todos los tratamientos que recibieron inoculación biológica, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

°Brix.

Figura 9.

Contenido de sólidos solubles totales (°Brix) en los frutos según el tratamiento aplicado.



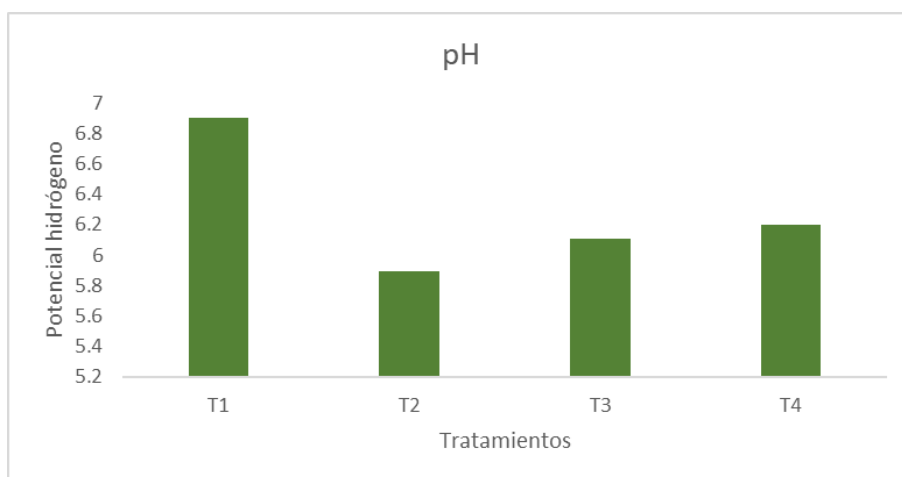
En la Figura 9 se observa el contenido de sólidos solubles totales (°Brix) en los frutos cosechados. El tratamiento T1 registró la mayor concentración de azúcares con un valor de 7,4 °Brix, seguido por los tratamientos T3 y T2 con 7,0 y 6,4 °Brix, respectivamente. Por el contrario, el tratamiento testigo (T4) presentó el valor más bajo (4,6 °Brix), lo que sugiere que la aplicación de los tratamientos influyó positivamente tanto en el rendimiento como en la calidad

organoléptica de los frutos, mejorando la acumulación de azúcares en comparación con las plantas sin tratamiento.

pH.

Figura 10.

Potencial de hidrógeno (pH) medido en los frutos según el tratamiento aplicado.

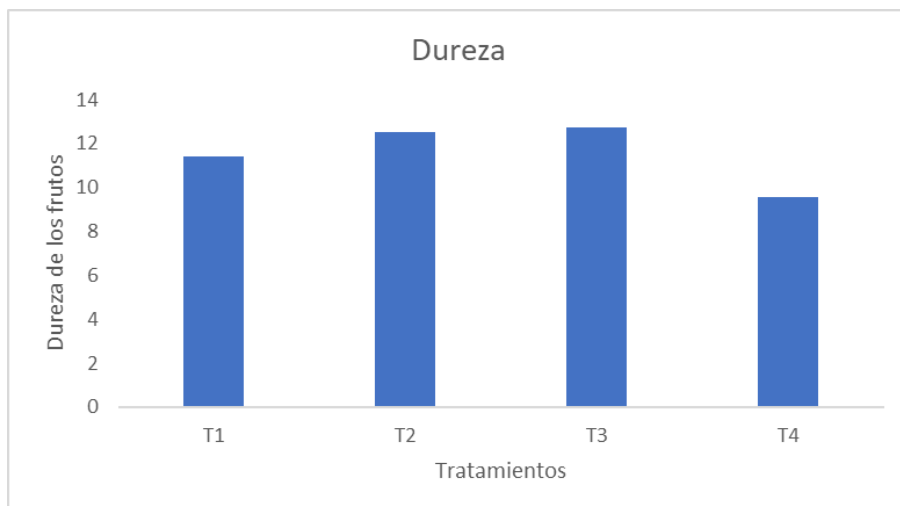


En la Figura 10 se presenta el potencial de hidrógeno (pH) de los frutos cosechados al final del ensayo. Los resultados muestran que el tratamiento T1 registró el valor más alto con un pH de 6,9, aproximándose a la neutralidad. Por el contrario, el tratamiento T2 presentó el nivel más bajo con un valor de 5,9, lo que indica una mayor acidez relativa en comparación con los demás grupos. Los tratamientos T3 y T4 mostraron un comportamiento intermedio, con valores de 6,1 y 6,2 respectivamente. Esta variabilidad sugiere que el uso de inoculantes biológicos influyó en el equilibrio ácido-base de los frutos, donde el tratamiento con *Trichoderma* individual (T1) favoreció la obtención de frutos menos ácidos.

Dureza.

Figura 11.

Dureza de los frutos cosechados según el tratamiento aplicado.

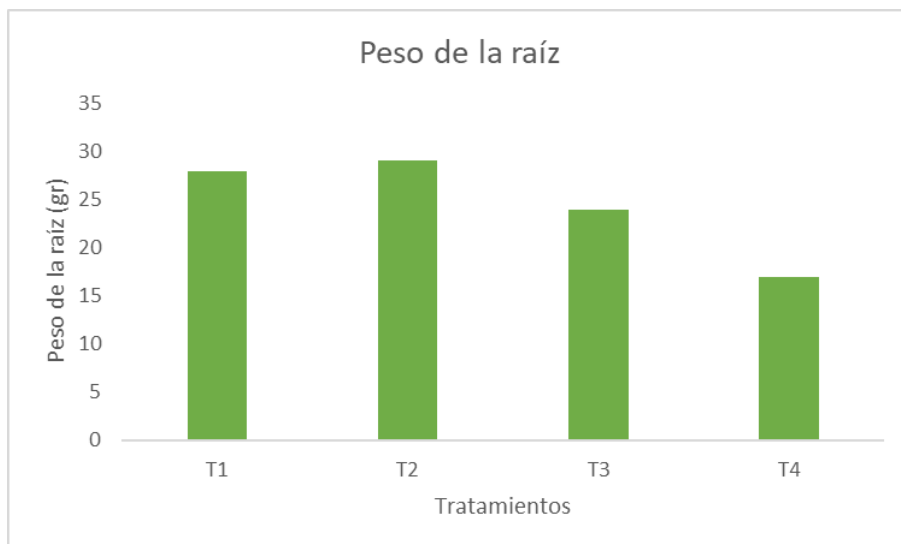


En la Figura 11 se presenta la dureza o firmeza de los frutos al momento de la cosecha. Los resultados indican que el tratamiento T3 (*Trichoderma* + Micorriza) registró la mayor media con un valor de 12,8, seguido de cerca por el tratamiento T2 con 12,5. Por el contrario, el tratamiento T4 (Testigo) presentó la menor firmeza con un valor de 9,6. Estos datos sugieren que la inoculación biológica influyó positivamente tanto en la consistencia del fruto como en su resistencia estructural, lo que representa una ventaja significativa para el manejo postcosecha y el transporte, en comparación con las plantas que no recibieron ningún tratamiento.

Peso de la raíz.

Figura 12.

Peso de la raíz (g) obtenido según el tratamiento aplicado.

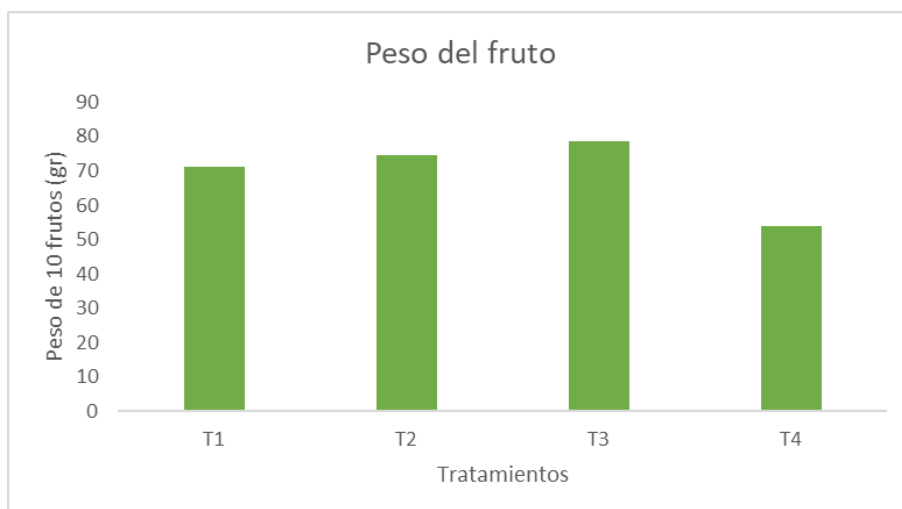


En la Figura 12 se presenta el peso de la raíz para cada uno de los tratamientos evaluados. Los resultados indican que el tratamiento T2 registró el mayor desarrollo radicular con un promedio de 29,0 g, seguido muy de cerca por el tratamiento T1 con 28,0 g. Por el contrario, el tratamiento T4 (Testigo) presentó el peso más bajo con 17,0 g, lo que demuestra que la inoculación biológica favoreció el crecimiento del sistema radicular tanto en las aplicaciones individuales como en la combinación de microorganismos (T3). Resulta interesante observar que, si bien el tratamiento T3 fue el más eficiente en la producción de frutos, los mayores incrementos de biomasa radicular se concentraron en los tratamientos T2 y T1.

Peso del fruto.

Figura 13.

Peso promedio del fruto por tratamiento

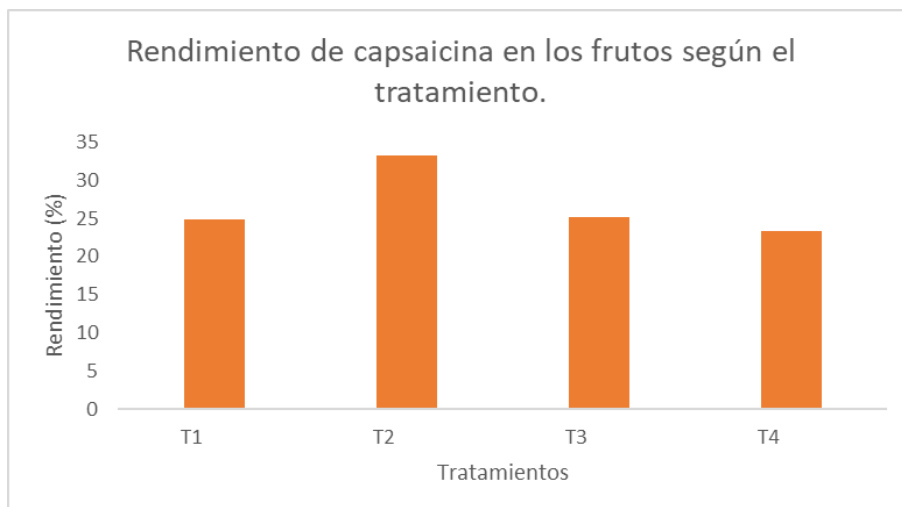


La Figura 13 detalla los resultados obtenidos para la variable peso del fruto, donde se evidencia que el tratamiento T3 alcanzó el mayor desempeño con un promedio de 10 frutos de 78 g. Le siguen en orden descendente los tratamientos T2 y T1, con valores aproximados de 74 g y 71 g respectivamente. Por el contrario, el tratamiento T4 registró el menor peso promedio de la evaluación, situándose por debajo de los demás niveles con aproximadamente 54 g.

Rendimiento de Capsaicina.

Figura 14.

Rendimiento de capsaicina (g) en los frutos según el tratamiento aplicado.



En la Figura 14 se observa el rendimiento de capsaicina expresado en porcentaje para los diferentes tratamientos evaluados. El tratamiento T2 (Micorrizas) destaca ampliamente con el valor más elevado de la investigación (33,28 %), superando de manera notable al resto de los grupos. Los tratamientos T3 y T1 presentaron resultados intermedios y relativamente cercanos entre sí (25, 14% y 24,85%). Finalmente, el tratamiento T4 (Testigo) registró la menor concentración de este compuesto (23,28%). Este incremento en el T2 sugiere que la simbiosis micorrícica no solo favorece el peso físico del fruto, sino que también estimula la ruta biosintética de metabolitos secundarios, mejorando tanto la pungencia como la calidad química del producto final.

Análisis radicular.

Figura 15.

Métodos de referencia y protocolos de análisis foliar para tejido radicular.

INFORME: ANÁLISIS FOLIAR (Raíces)

PT0901.REV01

Pág 1/2

Código Agrarprojekt:	SMM-191225	Informe de Ensayo N°	2963
Fecha de Recepción:	19-12-25	Fecha de Informe:	05-01-26
DATOS DEL CLIENTE			
Cliente:	Samira Monar		
Solicitado por:	Samira Monar		
Ubicación:	Santo Domingo	Teléfono:	0985335535
PROCESO DE ANÁLISIS			
Método utilizado para la preparación de la muestra ("Método Incineración Seca"):			
Secamiento de las raíces → Desmenuzación ("40 mesh") → Incineración Seca → Dilución en "Agua Regia"			
Proceso según "G. Bryson. 2014. Plant Analysis Handbook III. 571 pp."			
MÉTODOS DE REFERENCIA UTILIZADOS			
PARÁMETROS	MÉTODO		
Nitrógeno Total Kjeldahl (N-Total)	AOAC 978.04		
Fósforo (P)	SM 4500-P C		
Potasio (K)	SM 3500-K B / AOAC 975.03		
Magnesio (Mg)	AOAC 975.03		
Calcio (Ca)	AOAC 975.03		
Azufre (S)	AOAC 923.01		
Sodio (Na)	SM 3500-Na B		
Hierro (Fe)	AOAC 975.03		
Manganeso (Mn)	AOAC 975.03		
Cobre (Cu)	AOAC 975.03		
Zinc (Zn)	AOAC 975.03		
Boro (B)	AOAC 982.01		
Molibdeno (Mo)	EPA 7010		
Silicio (Si)	EPA 7010		
Cloruro (Cl ⁻)	SM 4500-Cl G / SM 4500-Cl D Método Potenciométrico		
% Materia Seca	AOAC 930.04		

RESULTADOS

Código Agrarprojekt:

SMM-191225

Pág 2/2

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA				
Tipo de Muestra:	Raíz			
Cultivo:	Aji (Escorpión)			
Número de Muestra:	# 1	# 2	# 3	# 4
Información Proporcionada por el Cliente:	Testigo	Micorriza	Trichoderma	Interacción Micorriza + Trichoderma

Contenido de macro- y microelementos en Materia Seca (macroelementos en %, microelementos en ppm equivalente a mg/kg)

Análisis	Unidad	Resultado	Resultado	Resultado	Resultado
Nitrógeno Total (N)	%	1,93	2,40	2,13	1,77
Fósforo (P)	%	0,14	0,18	0,14	0,14
Potasio (K)	%	3,00	2,06	2,25	2,72
Magnesio (Mg)	%	0,19	0,22	0,21	0,19
Calcio (Ca)	%	1,73	1,60	1,44	1,57
Azufre (S)	%	0,40	0,31	0,36	0,43
Sodio (Na)	%	0,04	0,04	0,04	0,04
Hierro (Fe)	ppm	438	634	632	692
Manganeso (Mn)	ppm	33,6	37,2	52,4	40,8
Cobre (Cu)	ppm	20,6	21,6	33,2	21,0
Zinc (Zn)	ppm	37,8	53,8	47,0	40,0
Boro (B)	ppm	44,6	39,4	36,8	37,2

- = No Aplica

Nota:

- Los datos y resultados están basados en la información y muestras entregadas por el cliente para quien se ha realizado este informe de manera exclusiva y confidencial.
- La fecha de ensayo y los métodos utilizados están a disposición del cliente cuando lo requiera.
- El Laboratorio no realizó el muestreo por lo tanto no certifica el origen de las muestras.
- Prohibida la reproducción total o parcial de Los resultados. No procede copia.

Agrarprojekt S.A.

Dr. Karl Sponagel Director del Laboratorio



Los resultados que se obtuvieron demuestran que el tratamiento T2 es el que más absorción de fósforo tiene respecto al resto de tratamientos, lo mismo sucede con el nitrógeno, el potasio tiene bajos niveles a nivel radicular en los tratamientos (T1,T2,T3), lo cual se debe a que las muestras fueron tomadas en época de producción, es decir que el potasio se está utilizando para el desarrollo de flores y frutos.

Análisis Costo-Beneficio

Tabla 24.

Costos para el establecimiento y mantenimiento del cultivo de ají

Rubro	Cantidad	V. Unitario	V. Total
Insumos para el establecimiento del cultivo			
Plántulas de ají	403	0.03	12.09
Fertilizante	1	35	35
Fitosanitarios (Insecticida/Fungicida)	1	30	30
Materiales (Piola, Hoyadora, Azadón, Estacas)	1	25	25
Depreciación (Herramientas)	1	10	10
Mantenimiento del cultivo			
Sistema de riego	8	18	144
Control de maleza	10	15	150
Podas	6	15	90
Cosecha	6	15	90
Costos Indirectos			
Imprevistos (5% sobre directos)	1	29.30	29.30
COSTO TOTAL			615.39

Nota: Los costos se presentan en dólares americanos.

La tabla presenta el detalle de los costos estimados para el establecimiento y mantenimiento del cultivo de ají, incluyendo insumos iniciales, labores de manejo, costos indirectos e imprevistos. Se observa que la mayor inversión corresponde a las actividades de mantenimiento, como riego y control de maleza, alcanzando un costo total proyectado de \$615,39, expresado en dólares americanos.

Costos de producción variables

Tabla 25.

Costos de producción variables por tratamiento (T1, T2, T3 y T4)

Concepto	T1	T2	T3	T4
Sustrato				
Humus de lombriz	15	15	15	15
Mano de Obra				
Preparación del sustrato (cámara térmica)	10	10	10	10
Hoyado y llenado del sustrato inoculado	10	10	10	10
Insumos biológicos				
Trichodermas + Melaza	5	5	5	0
Micorrizas + Melaza	16	16	16	0
COSTO TOTAL	56	56	56	35

Nota: Los costos se presentan en dólares americanos.

La tabla muestra los costos de producción variables por tratamiento (T1, T2, T3 y T4), considerando sustrato, mano de obra e insumos biológicos. Se observa que los tratamientos T1, T2 y T3 presentan un costo total uniforme de \$56, debido a la incorporación de microorganismos (Trichodermas y Micorrizas), mientras que el tratamiento T4 registra un menor costo (\$35) al no incluir insumos biológicos. Los valores se expresan en dólares americanos.

Rentabilidad y relación costo-beneficio

Tabla 26.

Análisis de rendimiento y rentabilidad económica de los tratamientos evaluados.

Tratamiento	Peso promedio del fruto (gr)	Cantidad promedio de frutos	Rendimiento (kg)	Ingreso Bruto	Ingreso Bruto anual	Costo total	Utilidad neta	B/C
T1	7,12	103,8	74,460	74,460	446,759	209,750	237,009	2,130
T2	7,44	116,2	87,101	87,101	522,607	209,750	312,857	2,492
T3	7,86	136,4	108,014	108,014	648,087	209,750	438,337	3,090
T4	5,4	73,4	39,933	39,933	239,600	188,840	50,760	1,269

En la tabla 26 se presenta el análisis de rendimiento y rentabilidad económica de los tratamientos evaluados en el ensayo. Los resultados indican que el tratamiento T3 registró el mayor rendimiento total (108,014 kg) y el peso promedio por fruto más elevado (7,86 g), logrando consecuentemente la relación beneficio/costo más alta con un valor de 3,09.

Por el contrario, el Testigo (T4) mostró el desempeño más deficiente en todos los indicadores. A pesar de tener un costo de producción menor (188,840), su baja productividad (39,933 kg) resultó en una utilidad neta mínima de 50,760 y una relación B/C de apenas 1,269. En conclusión, la diferencia entre el mejor tratamiento (T3) y el testigo confirma que la inversión en insumos biológicos es determinante para maximizar tanto la calidad del fruto como la rentabilidad del cultivo.

Conclusiones

El presente estudio permitió comprender de manera integral cómo la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y *Trichoderma spp.* influye en la absorción de fósforo y otros macronutrientes en el cultivo de ají, dando cumplimiento al objetivo general planteado. En este sentido, los resultados obtenidos demostraron que la aplicación de estos microorganismos tuvo un efecto favorable sobre la eficiencia nutricional del cultivo, especialmente bajo las condiciones propias del Bosque Húmedo Tropical, donde la fuerte fijación del fósforo en el suelo representa una de las principales limitantes edáficas.

Por otra parte, al analizar los tratamientos evaluados, se evidenció que las micorrizas arbusculares favorecieron una mayor concentración de fósforo en el sistema radicular en comparación con el tratamiento testigo. Este comportamiento confirma que la relación simbiótica entre la planta y el hongo amplía significativamente la superficie efectiva de absorción, gracias al desarrollo de hifas extraradicales que exploran mayores volúmenes de suelo. De esta manera, se facilita la captación de un nutriente de baja movilidad como el fósforo, lo que reafirma la importancia de esta asociación en sistemas agrícolas tropicales.

Asimismo, la coinoculación de Micorriza + *Trichoderma spp.* mostró un efecto positivo en el equilibrio nutricional global del cultivo, particularmente en nitrógeno y potasio. Esto sugiere que ambos microorganismos actúan de manera complementaria, generando una interacción sinérgica que fortalece el metabolismo vegetal y optimiza el funcionamiento del sistema radicular. Como consecuencia, la planta logra un mejor aprovechamiento de los nutrientes disponibles en el suelo.

En cuanto al potasio, la menor concentración radicular observada en el tratamiento con micorriza no debe interpretarse como una deficiencia nutricional. Por el contrario, este comportamiento puede atribuirse a una mayor movilización y translocación del nutriente hacia

los órganos aéreos, posiblemente vinculada a un incremento en la actividad metabólica y productiva de la planta. En otras palabras, se evidencia una mayor eficiencia fisiológica en el uso del potasio.

Adicionalmente, el diseño experimental implementado permitió realizar una comparación objetiva entre los tratamientos, lo que facilitó la identificación de diferencias significativas en la absorción de fósforo en el tejido vegetal. En consecuencia, se acepta la hipótesis alternativa, al comprobarse que al menos uno de los tratamientos generó un efecto significativo sobre la variable evaluada.

Los hallazgos obtenidos permiten afirmar que el manejo biológico del suelo mediante la inoculación con HMA y *Trichoderma spp.* constituye una alternativa técnica viable y ambientalmente sostenible. Esta estrategia no solo mejora la eficiencia nutricional del cultivo de ají, sino que también contribuye a disminuir la dependencia de fertilizantes fosfatados de síntesis química, promoviendo sistemas productivos más resilientes y sostenibles en condiciones tropicales.

Recomendaciones

Se recomienda incorporar el uso de hongos micorrízicos arbusculares en el cultivo de ají, especialmente en suelos tropicales donde la disponibilidad de fósforo es limitada. En este contexto, la inoculación representa una estrategia eficiente para optimizar la absorción de este nutriente y mejorar el desempeño nutricional del cultivo.

Asimismo, es fundamental realizar el tutorado y las podas en el momento oportuno. Estas prácticas no solo previenen el cruce excesivo de ramas y el posible volcamiento o caída

de las plantas, sino que también favorecen una adecuada aireación y una mejor penetración de la luz, condiciones que influyen directamente en el crecimiento, la sanidad y la productividad del cultivo.

De igual manera, se sugiere aplicar la coinoculación de Micorriza + *Trichoderma spp.* como una alternativa de manejo biológico integral, ya que su interacción complementaria contribuye a mantener un mejor equilibrio nutricional y a estimular el desarrollo radicular, fortaleciendo así la capacidad de la planta para aprovechar los nutrientes disponibles en el suelo.

Referencias bibliográficas.

- Múnera Vélez, G. A., & Meza Sepúlveda, D. C. (s.f.). El fósforo: elemento indispensable para la vida vegetal. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnología, Programa de Tecnología Química, Laboratorio de Análisis de Suelos.
<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/7377066a-bac4-4402-a306-eb45caa49d1c/content>
- Duan, C., Wang, L., & Zhao, X. (2025). Enzyme-mediated phosphorus mineralization and microbial regulation in agricultural soils. *PeerJ*, 13(1), e18140.
<https://peerj.com/articles/18140/>
- Giles, C. D., George, T. S., & McGrath, S. P. (2023). Organic acids enhance phosphorus availability by complexing metal cations in soil environments. *Soil Science Society of America Journal*, 87(2), 352–364.
<https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/saj2.20532>

- Wang, Q., Zhang, X., & Liu, J. (2025). Microbial community responses and phosphorus cycling under varying nutrient conditions. *Soil*, 11(1), 389–405.
<https://soil.copernicus.org/articles/11/389/2025/>
- Zhang, J., Chen, Y., & Li, H. (2024). pH-driven phosphorus dynamics and fixation in calcareous and acidic soils. *Soil Systems*, 8(1), 12. <https://www.mdpi.com/2571-8789/8/1/12>
- Rojas Chaparro, F. E., Colmán Ribelatto, P. J., Melgarejo Arrúa, M. A., Peralta Paiva, E. A., Maidana Chávez, E., Amarilla Mercado, D., & Bogado Cáceres, M. (2023). Efecto de *Trichoderma* spp. asociado a la fertilización fosfatada en el cultivo de tomate = Effect of *Trichoderma* spp. associated with phosphate fertilization in tomato cultivation. *IDESIA* (Chile), 41(3), 69-76.
<https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v41n3/0718-3429-idesia-41-03-69.pdf>
- Matas Baca, M. Á. (2007). *Trichoderma* fungi as an agricultural biological control in Mexico. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 29(3), 79-114.
<https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2022.11.015>
- Osorio, M. S., & Rodríguez, A. R. (s.f.). Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF): una alternativa biotecnológica para una agricultura sostenible. *Entramado*, 10(2). Recuperado el 11 de noviembre de 2025, de <http://www.scielo.org.co/pdf/entra/v10n2/v10n2a18.pdf>
- Vargas-Barrantes, P., & Castro-Barquero, L. (2018). Aislamiento y evaluación de microorganismos solubilizadores de fósforo de Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 43(1), 47-62. Recuperado de <https://www.scielo.sa.cr/pdf/ac/v43n1/0377-9424-ac-43-01-47.pdf>
- Gadea, P., & Peña, W. (2013). La importancia de la relación entre las micorrizas arbusculares y el fósforo en nuestros suelos. *UNED Research Journal (Cuadernos de Investigación UNED)*

- Arias Mota, R. M., Romero Fernández, A. J., Bañuelos Trejo, J., & De la Cruz Elizondo, Y. (2017). Inoculación de hongos solubilizadores de fósforo y micorrizas arbusculares en plantas de jitomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*
- Mora-Quilismal, S. R., Cuaical-Galárraga, E. T., García-Bolívar, J., Revelo-Ruales, V. W., Puetate-Mejía, L. M., Aguila-Alcantara, E., & Ruiz-Sánchez, M. (2021). Biofertilización con bacterias solubilizadoras de fósforo y hongos micorrízicos arbusculares en el cultivo de la papa. *Cultivos Tropicales*
- Marín-Salazar, C., Lemus-Vivas, H. F., Bueno-López, L., & Álvarez-Aldana, A. (s.f.). *Trichoderma y micorrizas como promotores de crecimiento en Solanum lycopersicum L. (tomate)*
- Erazo, J. G., Pastor, N. A., Giordano, D. F., Reynoso, M. M., Rovera, M., & Torres, A. M. (2020). Solubilización de fosfatos por *Trichoderma harzianum* ITEM 3636 y su efecto en plantas de maní. En XXXV Jornada Nacional del Maní: Libro de resúmenes. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
- Selection of Habanero Pepper F1 Hybrids (*Capsicum chinense* Jacq.) at the Yucatan Peninsula, Mexico with a High Potential for Different Markets. *Agriculture*, 10(10), 478. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100478>
- Vera, C. (2015). QUEVEDO - LOS RÍOS - ECUADOR 2015. [Trabajo de grado no publicado]. Repositorio UTEQ. Recuperado de <https://repositorio.uteg.edu.ec/server/api/core/bitstreams/96ca1a05-3a6f-487a-9418-6c90cf537a56/content>
- Variabilidad y alto contenido de capsaicinoides en chiles habaneros nativos (*Capsicum chinense* Jacq.) de la Península de Yucatán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 41(4), 395-403.
- Silva, R., Hernández, P., & Duarte, L. (2022). Comportamiento agronómico y características morfológicas de *Capsicum chinense* Jacq. en condiciones controladas de cultivo.

- Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável, 12(3), 87-95. Recuperado de https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_serial&pid=1983-6325
- Baruah, J., Munda, S., Sarmah, N., Pandey, S. K., Chanda, S. K., Sastry, G. N., & Lal, M. (2024). Estimation of environment stability for fruit yield and capsaicin content by using two models in *Capsicum chinense* Jacq. (Ghost Pepper) with multi-year evaluation. PeerJ. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11246027/>
- García, M. L., Pérez, J. A., & Rojas, D. F. (2022). Evaluación morfológica y fisiológica de genotipos de *Capsicum chinense* en condiciones tropicales controladas. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, 17(4), e2215. <https://www.scielo.br/j/rbca/a/F3r6K8v9tL0mQ2hP9T8kZcF>
- da Mata, L.R., Ribeiro, P.G., Moreira, A.L. da C., et al. (2021). Morphological and anatomical characterization of peduncle, flower and fruit related to easy fruit abscission of *Capsicum chinense* (Solanaceae) genotypes. Genetics and Molecular Research, 20(4). <https://doi.org/10.4238/gmr18887>
- Ozga, J., et al. (2021). Exploration into natural variation for genes associated with fruit shape and size among *Capsicum chinense* collections. Scientia Horticulturae, 285, 110–125. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110125>
- García-Ruiz, X., et al. (2020). Morfometría de frutos y semillas del “ají mochoero” *Capsicum chinense* Jacq. Ciencia Tecnología Agropecuaria, 21(3). https://doi.org/10.21930/RCTA.VOL21_NUM3_ART:1598
- Morales-Santos, H., García-González, D., & Rangel-Mendoza, J. (2023). Influencia de factores edafoclimáticos en la productividad y calidad del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en regiones tropicales de México. Agronomía Mesoamericana, 34(2), 245–259.
- Rojas Chaparro, F. E., Colmán Ribelatto, P. J., Melgarejo Arrúa, M. A., Peralta Paiva, E. A., Maidana Chávez, E., Amarilla Mercado, D., & Bogado Cáceres, M. (2023). Efecto del *Trichoderma* spp. asociado a la fertilización fosfatada en el cultivo de tomate.

Ortiz-Calcina, N., Leon-Ttacca, B., Pauro-Flores, L., Borja-Loza, R., Mendoza-Coari, P. P., & Alfredo-Palao, L. (2023). Biofertilización con cepas de *Trichoderma* sp. sobre la nutrición de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) var. Salcedo INIA en invernadero. *Bioagro*