Evaluación de los residuos agroindustriales de banano como componentes de sustratos para el cultivo de *Hericium erinaceus*, determinando la formulación óptima para su crecimiento y producción de biomasa, con presencia de bioactivos de interés biotecnológico.

Moncayo Manobanda, Justin Patricio

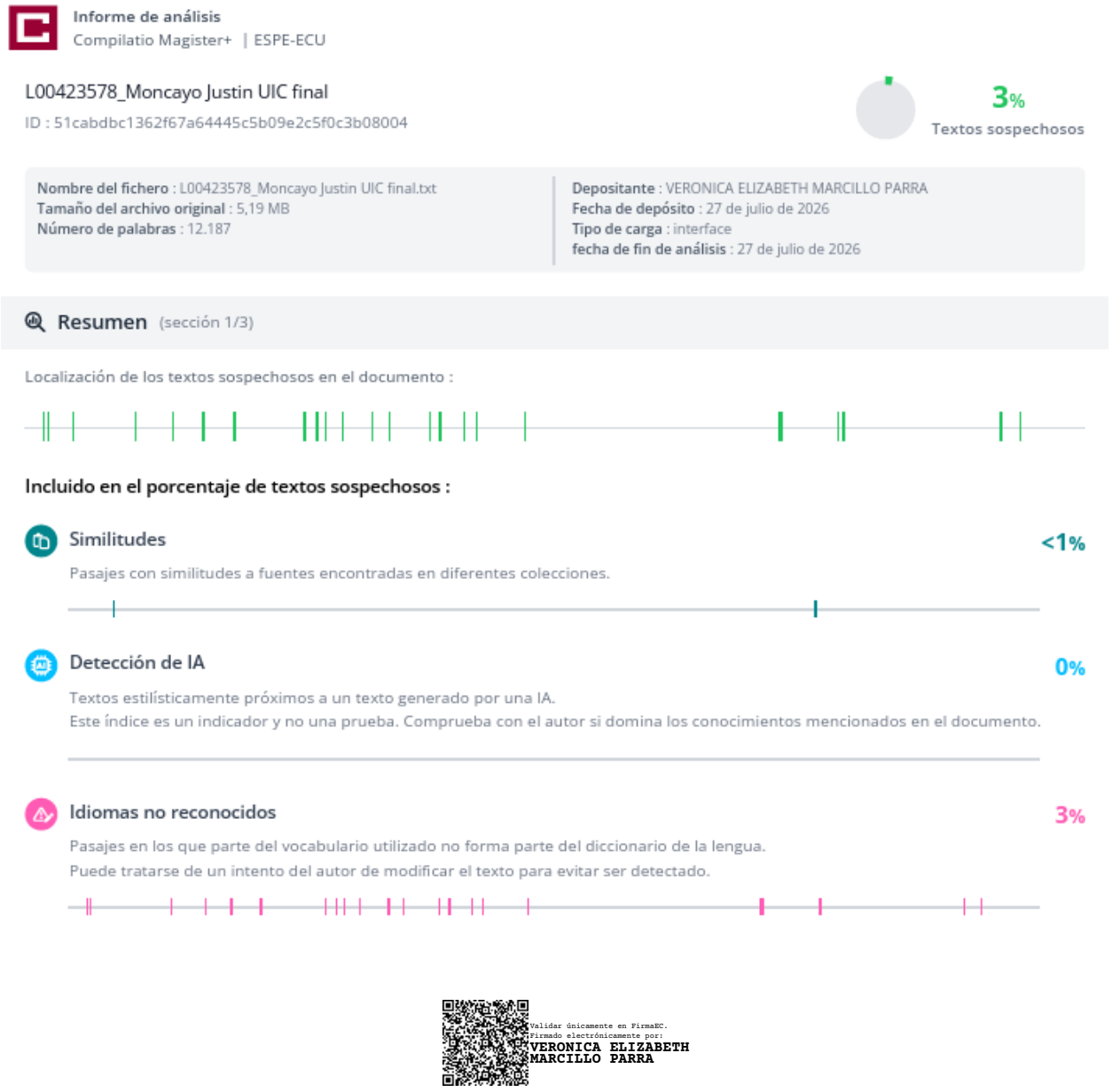
Departamento de Ciencias de la Vida y la Agricultura

Carrera de Biotecnología

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

Ing. Marcillo Parra, Verónica Elizabeth, PhD.

3 de agosto de 2026



Informe de análisis
Compilatio Magister+ | ESPE-ECU

L00423578_Moncayo Justin UIC final
ID : 51cabdbc1362f67a64445c5b09e2c5f0c3b08004

3%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : L00423578_Moncayo Justin UIC final.txt
Tamaño del archivo original : 5,19 MB
Número de palabras : 12.187

Depositante : VERONICA ELIZABETH MARCILLO PARRA
Fecha de depósito : 27 de julio de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 27 de julio de 2026

Resumen (sección 1/3)

Localización de los textos sospechosos en el documento :

Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes <1%
Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.

Detección de IA 0%
Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.
Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.

Idiomas no reconocidos 3%
Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua.
Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
VERONICA ELIZABETH MARCILLO PARRA

PhD. Marcillo Parra, Verónica Elizabeth

Directora del proyecto de integración curricular

Departamento de Ciencias de la Vida y la Agricultura

Carrera de Biotecnología

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: "**Evaluación de los residuos agroindustriales de banano como componentes de sustratos para el cultivo de *Hericium erinaceus*, determinando la formulación óptima para su crecimiento y producción de biomasa, con presencia de bioactivos de interés biotecnológico.**" fue realizado por el señor **Moncayo Manobanda, Justin Patricio,** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; habiéndose efectuado una revisión integral de forma y de fondo conforme a los lineamientos y formatos institucionales vigentes. 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.

Sangolquí, 20 de agosto de 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
VERONICA ELIZABETH MARCILLO PARRA

PhD. Marcillo Parra, Verónica Elizabeth

Directora del proyecto de integración curricular

C.C.: 1713167698

Departamento de Ciencias de la Vida y la Agricultura

Carrera de Biotecnología

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Moncayo Manobanda, Justin Patricio**, con cédula de ciudadanía n° 1729277382, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular**: Evaluación de los residuos agroindustriales de banano como componentes de sustratos para el cultivo de *Hericium erinaceus*, determinando la formulación óptima para su crecimiento y producción de biomasa, con presencia de bioactivos de interés biotecnológico.,** es de mi 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.

Sangolquí, 20 de agosto de 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JUSTIN PATRICIO
MONCAYO MANOBANDA

Moncayo Manobanda, Justin Patricio

C.C.: 1729277382

Departamento de Ciencias de la Vida y la Agricultura

Carrera de Biotecnología

Autorización de Publicación

Yo **Moncayo Manobanda, Justin Patricio**, con cédula de ciudadanía n°1729277382, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Título: "Evaluación de los residuos agroindustriales de banano como componentes de sustratos para el cultivo de *Hericium erinaceus*, determinando la formulación óptima para su crecimiento y producción de biomasa, con presencia de bioactivos de interés biotecnológico"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 20 de agosto de 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JUSTIN PATRICIO
MONCAYO MANOBANDA

Moncayo Manobanda, Justin Patricio

C.C.: 1729277382

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios y a todas las personas que ocupan un lugar especial en mi corazón, por el inmenso cariño que me han dado a lo largo de mi vida.

A mis queridos hermanos, Gaby, Víctor y Mishell, este logro también les pertenece. Gracias por cada consejo, por las innumerables risas compartidas y por el apoyo incondicional que me brindaron a lo largo de este camino. Su compañía hizo más llevadero cada desafío y su confianza en mí fue un impulso constante para seguir adelante.

A Doménica, te dedico de corazón una parte de este trabajo por haber sido mi compañera más cercana durante este recorrido académico, prácticamente desde sus inicios. Gracias por creer en mí incluso en los momentos de mayor incertidumbre, por impulsarme siempre a dar lo mejor de mí y por recordarme, con tu apoyo y cariño, que cada esfuerzo valía la pena.

Finalmente, a mi madre, la Lic. Blanca Manobanda. Aunque estas líneas sean las últimas de esta dedicatoria, son las que nacen con mayor profundidad de mi corazón. Sin ella, este logro simplemente no habría sido posible. Mi camino como hombre y como profesional se ha construido sobre el ejemplo de su esfuerzo, su sacrificio y su fortaleza inquebrantable. No conozco a nadie más valiente que ella. Este trabajo representa apenas un pequeño reflejo de todo lo que me ha enseñado y de la admiración que siento por su manera de afrontar la vida. Llevaré siempre conmigo sus enseñanzas y la convicción que sembró en mí: nunca rendirme ante las dificultades.

Agradecimiento

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi tutora, la PhD. Verónica Marcillo, por su constante acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación. Sus valiosos consejos, enseñanzas y apoyo fueron fundamentales en cada etapa de este proceso, guiándome con profesionalismo, dedicación y un profundo compromiso con la excelencia académica. Me llevo de su parte no solo lo académico, sino el ejemplo de cómo espero ser como profesional, alguien comprometido, amable y apasionado por el aprendizaje continuo.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento al PhD. Edwin Vera por brindar el acceso a los laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), donde, junto con su equipo de profesionales, fue posible llevar a cabo los ensayos previstos gracias al valioso apoyo técnico y académico recibido. Agradezco también a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo de esta investigación con su constante disposición, apoyo, compañía y amistad durante mi estancia en las instalaciones del Departamento de Ciencias de Alimentos y Biotecnología (DECAB).

Finalmente, expreso mi más profundo agradecimiento a mi madre, la Lic. Blanca Manobanda, quien realizó innumerables sacrificios personales y económicos para hacer posible la culminación de este trabajo. Gracias por acompañarme con paciencia en los momentos de mayor estrés, tristeza y frustración, por sostenerme cuando las fuerzas parecían agotarse y por brindarme siempre, con amor y generosidad, todo aquello que estaba a su alcance. Su apoyo incondicional fue el motor que me permitió llegar hasta la meta y concluir esta importante etapa de mi vida.

Índice de contenidos

Certificación 3

Responsabilidad de Autoría 4

Dedicatoria 6

Agradecimiento 7

Resumen 14

Abstract 15

Capítulo I 16

Introducción 16

Planteamiento del problema 17

Formulación del problema o pregunta de investigación 18

Formulación del problema 18

Pregunta de investigación 19

Objetivos 19

Capítulo II 22

Estado del arte 22

Cultivo de hongos comestibles en residuos agroindustriales 22

Investigaciones sobre Hericium erinaceus y sustratos alternativos 23

Influencia del sustrato en el perfil químico 24

Aprovechamiento de residuos de banano 25

Residuos de banano para crecimiento de hongos 25

Propiedades bioactivas investigadas de *Hericium erinaceus* 26

Contenido de fenoles en *Hericium erinaceus* 27

Capacidad antioxidante en *H. erinaceus* 27

Marco teórico 28

Producción bananera en Ecuador 28

Generación de residuos lignocelulósicos del banano 30

Características lignocelulósicas de los residuos de banano 31

Biotecnología ambiental y economía circular 32

Hongos comestibles y medicinales 33

Biología de Hericium erinaceus 35

Cultivo de Hericium erinaceus 36

Compuestos bioactivos de Hericium erinaceus 36

Estrés oxidativo y antioxidantes 38

Métodos de evaluación antioxidante 39

Marco conceptual 40

Variables de control en el cultivo de hongos comestibles 40

Relación C:N en sustratos 40

Humedad 40

Fotoperiodo 40

Parámetros de crecimiento Micelial y fisiología Fúngica 41

Tiempo de colonización 41

Tiempo de fructificación 41

Índices de Rendimiento y Bioconversión de la Biomasa 41

Eficiencia biológica 41

Parámetros Analíticos de la Capacidad Antioxidante 42

Concentración inhibidora de radical 50 42

Concentración equivalente a Trolox 42
Concentración equivalente a ácido gálico 42
Capítulo III 43
Metodología 43
Enfoque de investigación 43
Tipo y diseño de investigación 43
Tipo de investigación 43
Diseño de la investigación 44
Materia prima 44
Sitio y método de recolección 44
Preparación del sustrato 44
Técnica e instrumento 45
Técnicas de evaluación del crecimiento micelial 45
Técnicas de evaluación de biomasa 45
Método de extracción 45
Contenido de fenoles totales 46
Técnicas de evaluación antioxidante 46
Validación y confiabilidad del instrumento 47
Consideraciones éticas 47
Variables experimentales 47
Variables independientes 48
Variables dependientes 48
Variables controladas 48
Diseño experimental 49

Análisis estadístico 49

Capítulo IV 51

Análisis y discusión de los resultados 51

Recolección y selección de los residuos de banano 51

Desempeño del crecimiento micelial en los distintos sustratos 52

Eficiencia Biológica 57

Elección de solvente 61

Concentración de fenoles totales 63

Actividad antioxidante de los extractos obtenidos 65

Capítulo V 69

Conclusiones 69

Recomendaciones 70

Referencias: 71

Índice de tablas

Tabla 1 *Contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa de los residuos lignocelulósicos del cultivo de banano, en base seca* *31*

Tabla 2 *Contenido de nitrógeno en los residuos de banano reportados en literatura* *32*

Tabla 3 *Top 10 de países productores de hongos comestibles y medicinales en el mundo* *34*

Tabla 4 *Clasificación científica del hongo melena de león (Hericium erinaceus).* *36*

Tabla 5 *Sustratos y condiciones de cultivo utilizados para Hericium erinaceus en investigaciones* *37*

Tabla 6 *Matriz de operacionalización de variables* *48*

Tabla 7 *Resumen de las variables utilizadas en el diseño de la investigación* *49*

Tabla 8 *Tratamientos utilizados en la experimentación* *50*

Tabla 9 *Resultados del ensayo de crecimiento radial realizado en cajas Petri* *52*

Tabla 10 *Resultados obtenidos del tiempo necesario para la colonización del 50% del sustrato* *54*

Tabla 11 *Resultados del cultivo en bolsas de Hericium erinaceus en el tiempo* *55*

Tabla 12 *Resultados de la cosecha del cultivo de Hericium erinaceus en bolsas* *58*

Tabla 13 *Resultados obtenidos en la prueba de fenoles totales con los solventes utilizados para la extracción de compuestos* *63*

Tabla 14 *Concentración de compuestos fenólicos obtenidos en los tratamientos* *63*

Tabla 15 *Resultados del ensayo de capacidad antioxidante con DPPH.* *66*

Índice de figuras

Figura 1 *Producción de residuos agroindustriales derivados del cultivo de banano a nivel provincial. 29*

Figura 2 *Morfología de la Planta de Banano (Musa spp.).....30*

Figura 3 *Hongos comestibles estudiados por efectos nutricionales y anticancerígenos en el cáncer de mama. 34*

Figura 4 *Morfología y crecimiento de Hericium erinaceus.....35*

Figura 5 *Compuestos bioactivos presentes en la biomasa de Hericium erinaceus.....38*

Figura 6 *Cortes tomados del raquis de banano tras su recolección. 51*

Figura 7 *Resultados obtenidos del crecimiento radial en cajas Petri. 53*

Figura 8 *Resultados de la colonización micelial de Hericium erinaceus al 50%. 55*

Figura 9 *Resultados crecimiento micelial y desarrollo de primordios en unidades de cultivo.....56*

Figura 10 *Formación de los primordios luego de la inducción a la fructificación por cambio de condiciones 57*

Figura 11 *Resultados obtenidos de la cosecha en biomasa y eficiencia biológica 60*

Figura 12 *Resultados obtenidos en el ensayo de cuantificación de fenoles totales con diferentes solventes.....62*

Figura 13 *Curva de calibración obtenida para la estimación de fenoles totales.....63*

Figura 14 *Resultados de la cuantificación de fenoles totales obtenidos en los extractos de los tratamientos.....64*

Figura 15 *Curva de calibración utilizada para la determinación de capacidad antioxidante.....66*

Figura 16 *Diagrama de barras de la concentración equivalente a trolox de cada tratamiento 67*

Resumen

Los residuos agroindustriales de banano (*Musa spp.*) constituyen una importante fuente de contaminación ambiental en el Ecuador, principal exportador mundial de esta fruta. El estudio evaluó el potencial de estos residuos agroindustriales, integrando una mezcla de pseudotallo y raquis (1:1), como sustituto parcial de aserrín de madera dura en el sustrato para cultivar el hongo comestible y medicinal *Hericium erinaceus*. Con este fin, se analizaron cuatro niveles de sustitución del aserrín (0%, 10%, 20% y 30%). La adición de residuos de banano aceleró el crecimiento vegetativo, alcanzando una tasa de crecimiento radial máxima en la sustitución al 30% (3,04 $\pm$ 0,046 mm/día) y reduciendo el tiempo de colonización a 29,3 $\pm$ 1,53 días frente al control (0%) (35,3 $\pm$ 1,53 días). Sin embargo, la eficiencia biológica mostró una respuesta no lineal, con un mínimo en T1 (12,62 $\pm$ 1,52%) y un máximo en T3 (16,89 $\pm$ 1,45%). El contenido de fenoles totales mostró una tendencia parabólica, alcanzando un valor máximo en el tratamiento 2 con 20% de reemplazo (3141 $\pm$ 243 mg EAG/100 g seco) y disminuyendo con un reemplazo del 30% (1028 $\pm$ 34 mg EAG/100 g seco). La actividad antioxidante evaluada por DPPH mostró los mejores resultados para el T1 y T2 (22,91–22,28 μmol TE/g seco). Estos resultados respaldan el uso de residuos de banano como componente alternativo del sustrato para el cultivo de hongos comestibles y medicinales.

Palabras clave: *Musa spp., Hericium erinaceus*, residuos agroindustriales, capacidad antioxidante

Abstract

Banana (*Musa spp*.) agro-industrial residues constitute an important source of environmental pollution in Ecuador, the world's leading exporter of bananas. This study evaluated the potential of these agro-industrial residues by incorporating a 1:1 mixture of banana pseudostem and rachis as a partial substitute for hardwood sawdust in the substrate used to cultivate the edible and medicinal mushroom *Hericium erinaceus*. To this end, four levels of sawdust substitution (0%, 10%, 20%, and 30%) were evaluated. The incorporation of banana residues accelerated vegetative growth, achieving the highest radial growth rate at the 30% substitution level (3.04 ± 0.046 mm/day) and reducing the colonization time to 29.3 ± 1.53 days compared with the control treatment (0%) (35.3 ± 1.53 days). However, biological efficiency exhibited a nonlinear response, with the lowest value observed in T1 (12.62 ± 1.52%) and the highest in T3 (16.89 ± 1.45%). Total phenolic content followed a parabolic trend, reaching its maximum in Treatment 2 with 20% substitution (3141 ± 243 mg GAE/100 g dry weight) and declining at the 30% substitution level (1028 ± 34 mg GAE/100 g dry weight). Antioxidant activity, determined using the DPPH assay, showed the highest values for T1 and T2 (22.91–22.28 μmol TE/g dry weight). These findings support the use of banana residues as an alternative substrate component for the cultivation of edible and medicinal mushrooms.

Keywords: *Musa spp., Hericium erinaceus,* agro-industrial residues, antioxidant capacity.

Capítulo I

Introducción

Los residuos lignocelulósicos generados en la industria agrícola constituyen una materia prima excepcional no aprovechada, rica en carbono, nitrógeno y polímeros estructurales tales como la celulosa, hemicelulosa y la lignina. Por lo tanto, las investigaciones sobre el aprovechamiento de estos residuos constituyen una forma de generar conocimiento científico cuya aplicación incentiva la economía circular, valoriza la biomasa residual y genera subproductos de interés. En ausencia de estrategias de valorización, la incorrecta gestión de los desechos derivados de las actividades agrícolas puede desembocar en un problema ambiental que genere un impacto negativo en los ecosistemas y en la seguridad alimentaria.

En Ecuador, el cultivo de banano (*Musa spp*.) es un caso que genera interés para ser investigado. Esto se debe principalmente a que el fruto comestible de la planta representa una fracción reducida de la biomasa total producida por la planta. Mientras que los raquis, pseudotallos, hojas y pecíolos son desechados de forma inadecuada, provocando su acumulación en recursos hídricos y terrenos. Durante su descomposición, esta materia orgánica genera gases de efecto invernadero como el metano y favorece la proliferación de plagas (Jiménez, 2017).

Esta problemática se puede abordar con estrategias biotecnológicas, como la transformación de esta materia prima a través de una fermentación en estado sólido. Este proceso acelera la biodegradación de compuestos orgánicos complejos como la lignina y puede generar productos comestibles funcionales (Boa, 2005). Entre los organismos con la capacidad de realizar este proceso se puede destacar *Hericium erinaceus* (melena de león), un hongo que utiliza polímeros vegetales complejos como su principal fuente de carbono y produce metabolitos secundarios de alto interés científico (Ayala, 2024).

Las propiedades bioactivas del hongo melena de león son de interés científico por su actividad neuroprotectora, antidepresiva y estimulante de la neurogénesis. Su valor terapéutico radica en compuestos únicos llamados hericenonas y erinacinas capaces de atravesar la barrera hematoencefálica para estimular la producción del factor de crecimiento nervioso (NGF). Asimismo, posee polifenoles capaces de atrapar radicales libres y generar un efecto antioxidante y antiinflamatorio (Chong *et al.,* 2019; Menon *et al.,* 2025).

Esta investigación evalúa el efecto de la suplementación de residuos de banano en el desarrollo micelial, la fructificación y la capacidad antioxidante del hongo melena de león. Para este fin se realiza el seguimiento de su ciclo de vida bajo condiciones controladas y la cuantificación de su actividad antioxidante. El objetivo es evaluar la viabilidad de aprovechar la biomasa residual de la industria bananera, sentando las bases técnicas para la diversificación hacia áreas de micocultura y la valorización de este material lignocelulósico.

Este escrito está organizado en un total de 5 capítulos. El primer capítulo aborda la justificación, el planteamiento del problema y los objetivos del trabajo. El segundo capítulo desarrolla los aspectos teóricos, antecedentes y los conceptos clave para la investigación. El tercer capítulo establece el diseño experimental, protocolos y medidas consideradas para la obtención de resultados. El cuarto capítulo expone los resultados obtenidos de la experimentación y discute la justificación de su comportamiento. Por último, el capítulo final presenta las conclusiones y recomendaciones.

Planteamiento del problema

Ecuador provee aproximadamente el 30% de la oferta de banano a nivel mundial; no obstante, la actividad agrícola genera continuamente grandes volúmenes de desechos orgánicos. Al momento de cosechar el racimo solo alrededor del 30% de la biomasa de la planta es realmente aprovechada como un alimento (Palacios, 2016; Segarra, 2022). Un estimado de 40 millones de toneladas métricas de

residuos se producen cada nueve meses, cuya composición es principalmente pseudotallo, hojas, raquis y pseudopeciolo (Segarra, 2022).

La gestión inadecuada de la biomasa residual generada ha representado un problema ambiental crítico, ya que este material es abandonado en orillas de ríos, caminos, fincas o arrojados por vía acuática sin ninguna clase de tratamiento. La acumulación descontrolada de material orgánico excede la capacidad de degradación natural que posee el ecosistema, favoreciendo que se proliferen plagas, emitan gases de efecto invernadero y haya degradación de suelos y recursos hídricos (Palacios, 2016; Segarra, 2022).

Como señala Palacios (2016), los residuos agroindustriales del banano tienen una composición mayoritariamente lignocelulósica (88% de la biomasa), lo que hace que sean difíciles de degradar por parte de la mayoría de microorganismos. Aun así, la compleja maquinaria enzimática de los hongos del filo *Basidiomycota* es capaz de aprovechar esta fuente de carbono. Se ha reportado que la liberación de lacasas, celulasas, entre otras enzimas, depende del sustrato que el micelio tenga a su disposición (Herrera & Cárdenas, 2019).

Con esta alternativa, se podría permitir su uso como parte de sustratos para el cultivo de *Hericium erinaceus.* A pesar de esto, en Ecuador existe limitada información sobre cómo estos residuos influyen en el crecimiento micelial, la producción de biomasa y la actividad antioxidante del grupo de hongos comestibles y medicinales. Para eliminar estos vacíos de conocimiento es necesario evaluar su aprovechamiento como una alternativa sostenible que contribuya tanto a la valorización de residuos bananeros como al desarrollo de bioprocesos con interés biotecnológico.

Formulación del problema o pregunta de investigación

Formulación del problema

¿Los residuos agroindustriales de banano son una alternativa viable para la producción de biomasa de *Hericium erinaceus* comparable a los sustratos convencionales?

Pregunta de investigación

¿Cuál es la formulación de sustrato con residuos de banano óptima para el mejor desarrollo de *Hericium erinaceus*?

¿Cómo varía la capacidad antioxidante de la biomasa de Hericium erinaceus en función de la formulación del sustrato con residuos de banano?

¿Es recomendable usar residuos de banano en la formulación de sustratos para *Hericium erinaceus* para valorizar los mismos?

Objetivos

Objetivo general:

Evaluar los residuos agroindustriales de banano como componentes de sustratos para el cultivo de *Hericium erinaceus*, determinando la formulación óptima para su crecimiento y producción de biomasa, con presencia de bioactivos de interés biotecnológico.

Objetivos específicos:

- Evaluar el crecimiento micelial de *Hericium erinaceus* según la variación del medio sólido, mediante el análisis de diferentes parámetros de crecimiento.
- Determinar el rendimiento y la capacidad de crecimiento de *Hericium erinaceus* en sustratos optimizados derivados de residuos de banano, mediante su cultivo en módulos de sustrato sólido.
- Analizar los compuestos bioactivos presentes en la biomasa de *Hericium erinaceus* mediante la preparación de extractos con diferentes solventes y la evaluación de su actividad antioxidante.

Justificación

La industria del banano es una de las más importantes en países como Colombia y Ecuador, pero genera una cantidad masiva de desechos, donde solo el 30% de toda la biomasa es consumida como alimento. Esto representa cerca de 40 millones de toneladas métricas de residuos cada nueve meses en

Ecuador, que debido a la mala disposición generan afectación a la calidad de suelos, recursos hídricos y salud humana (Collazos y Pinzón, 2022; Segarra, 2022).

La propuesta planteada de utilizar los residuos de banano como materia prima para el cultivo de *Hericium erinaceus* radica en su potencial para generar alimentos funcionales. Esta alternativa permite cerrar el ciclo de vida de la producción bananera ecuatoriana de una forma sostenible y amigable con el medio ambiente, alineándose con los principios de la economía circular (Collazos y Pinzón, 2022; Webster, 2021).

Usar melena de león (*Hericium erinaceus*) es idóneo para valorizar los residuos de banano, debido a que pertenece al grupo de los hongos de pudrición blanca. Este grupo tiene la capacidad enzimática de degradar compuestos lignocelulósicos para obtener energía (Suwannarach et al., 2022). En este contexto, el material lignocelulósico herbáceo del banano es considerado una madera suave rica en celulosa (36-42%), hemicelulosa (29-34%) y lignina (10-20%). Estos polímeros se pueden degradar a través de celulasas y lacasas secretadas durante el crecimiento fúngico (Atila, 2019; Jiménez, 2017).

La suplementación de sustratos con residuos agroindustriales es una práctica común para aumentar la productividad. En literatura científica se evidencias efectos sobre la eficiencia biológica y la calidad de los hongos obtenidos. Al desarrollar y optimizar una formulación con residuos de banano se podrían obtener cosechas más pesadas y tiempos más cortos de crecimiento, disminuyendo de esta manera los riesgos de contaminación (Assan y Mpofu, 2014; Lisiecka et al., 2021).

El uso de residuos como el raquis y el pseudotallo puede reducir drásticamente los costos de producción frente a sustratos convencionales como el aserrín de madera dura (haya o roble), que pueden ser costosos o difíciles de conseguir según la ubicación. En zonas productoras de banano estos suplementos resultan abundantes y generalmente gratuitos o de costo mínimo, lo que podría traducirse en emprendimientos locales sostenibles (Collazos y Pinzón, 2022; Romero et al., 2024).

La investigación también aborda cómo se comporta la capacidad antioxidante con el cambio de sustrato, ya que se conoce que la composición de compuestos bioactivos se ve afectada con respecto al entorno donde se desarrolla el hongo. La suplementación podría tener un efecto en el valor farmacéutico y alimentario del producto final (Kala et al., 2025). De esta manera, los resultados obtenidos y conclusiones de este trabajo pueden llegar a ser de utilidad para valorizar los residuos de banano en un futuro.

Finalmente, esta investigación se vincula de manera integral con la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas. De forma particular, aporta al ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) al proponer alternativas de economía circular para la reutilización de biomasa residual; al ODS 13 (Acción por el Clima), dado que la valorización biotecnológica evita la acumulación y posterior descomposición anaerobia de residuos que generan gases de efecto invernadero como el metano en los campos agrícolas.

Capítulo II

Estado del arte

Cultivo de hongos comestibles en residuos agroindustriales

El cultivo de hongos comestibles ha sido un foco de investigación para poder mitigar el impacto de residuos agroindustriales; se considera una alternativa económica y ecológicamente práctica que permite abordar problemas de salud y alimentación. Los hongos son reconocidos como convertidores de celulosas baratas en proteínas de gran valor y alimentos funcionales. Su valor radica en la diversidad de compuestos bioactivos que poseen (Assan y Mpofu, 2014; Chutimanukul *et al*., 2023a).

Para el cultivo de este tipo de hongos se pueden utilizar una variedad de materias primas de productos lignocelulósicos como paja de arroz, paja de trigo, aserrín, rastrojo de maíz, cáscaras de algodón, bagazo de caña de azúcar, hojas de banano, paja de cáñamo, entre otras (Assan y Mpofu, 2014; Suwannarach et al., 2022). Esto es posible por la maquinaria molecular de los hongos de pudrición blanca capaz de producir enzimas extracelulares que combinan mecanismos hidrolíticos y oxidativos. De este modo, el conjunto de celulasas, hemicelulasas y ligninasas actúa sobre las macromoléculas, liberando compuestos de bajo peso molecular, esenciales para su desarrollo (Assan y Mpofu, 2014).

El éxito o el fracaso de un cultivo de macrohongos depende principalmente de la relación carbono-nitrógeno (C:N), al momento de usar cualquier residuo industrial se debe considerar este parámetro para evitar inhibir o reducir el crecimiento micelial ni la posterior fructificación. En sustratos con mucho nitrógeno se puede añadir otro rico en carbono, o en el caso contrario se complementa con salvado de trigo que compensa esta deficiencia (Assan y Mpofu, 2014; Suwannarach et al., 2022).

Otros aspectos importantes a considerar son el pH, conductividad eléctrica, la compactación y el tamaño de partícula que influyen en la disponibilidad del hongo a la humedad, intercambio gaseoso y a los nutrientes del sustrato (Kala et al., 2025).

Investigaciones sobre Hericium erinaceus y sustratos alternativos

De forma tradicional *Hericium erinaceus* se prefiere cultivar en el aserrín de maderas duras; no obstante, se han probado otros sustratos adaptados a la realidad geográfica y técnica del sitio de investigación. El aserrín de madera de bambú se ha probado en regiones tropicales, debido a que esta opción permite escalar los cultivos. Sin embargo, poseer nitrógeno abundante disminuye la eficiencia biológica y aumenta el número de cuerpos fructíferos más pequeños cuando se utiliza como único elemento del sustrato (Chutimanukul *et al.,* 2023).

La paja de cáñamo ha resultado ser una opción viable y rentable en comparación al aserrín de haya. Al poderse aprovechar varias veces los residuos procedentes del cultivos de hongo se han alineado con el objetivo de residuo cero (Kala *et al.,* 2025). En China, uno de los mayores cultivadores de hongos en el mundo ha buscado que el pasto reemplace la madera, una fórmula optimizada compuesta de 16,3% de paja de arroz y 59,7% de olote de maíz logro una eficiencia biológica del 89,14% y acortó el período de la primera cosecha entre 7 y 9 días (Lu *et al.,* 2024).

La literatura científica ha demostrado que independientemente del sustrato que se busque utilizar, este hongo prefiere la hemicelulosa como fuente de carbono durante la etapa de colonización inicial. El consumo de lignina empieza posteriormente y se intensifica con la fructificación, esto se debe a que el hongo primero prepara su maquinaria biológica antes de actuar sobre su fuente de carbono principal pero más difícil de procesar (Atila, 2019).

La eficiencia biológica ha sido relacionada de forma positiva con la concentración de lignina del sustrato. En contraste, se observa un efecto negativo cuando la concentración de hemicelulosa frente a la de lignina aumenta. Este fenómeno se explica por la naturaleza parásita de *Hericium erinaceus* en árboles de madera dura (Atila, 2019).

Influencia del sustrato en el perfil químico

En el trabajo de Kala *et al.* (2025) se ha reportado que la composición química presente en el micelio y el cuerpo fructífero está ampliamente modulada por la formulación del sustrato; este no solo es una fuente de nutrientes, sino un entorno de precursores químicos y posibles agentes de estrés. La calidad final del producto obtenido depende en gran medida de la formulación que se utilice en el cultivo (Assan y Mpofu, 2014; Atila, 2019).

Esta variación química se puede observar en la cantidad de erinacinas presentes en el micelio de *Hericium erinaceus*. Se ha reportado que la composición del medio de cultivo influye drásticamente su concentración, por ejemplo, con la suplementación de avena y dextrosa, la concentración de erinacina C decae, mientras que, con un medio mínimo la concentración de erinacina Q aumenta (Doar *et al.*, 2025).

Un punto clave, es que la expresión de genes relacionados con la biosíntesis (*eriE, eriG, eriI, eriC, eriJ, eriB, eriM*) de erinacinas, no muestran cambios de expresión a pesar del cambio de sustrato, lo que señala que la variación en su concentración, se debe principalmente a la composición de la fuente de carbono que tiene el hongo a su disposición durante su crecimiento (Doar *et al*., 2025).

En análisis previos del perfil químico de melena de león cuando se usan formulaciones de sustratos diferentes se han reportado cambios significativos. Al comparar una formulación a base de paja de cáñamo y salvado de trigo con una a base de aserrín de haya, se produce un aumento de la concentración del aminoácido antioxidante ergotioneína y una disminución de los compuestos lovastatina y ergosterol (importantes en el control del colesterol y precursores de la vitamina D respectivamente) (Kala *et al.*, 2025).

La acumulación de minerales y la capacidad antioxidante también se ven afectadas con un cambio de sustrato. La suplementación de harina de soja al sustrato puede aumentar el contenido fenólico total y la capacidad de eliminación de radicales libres del hongo. Asimismo, el uso de la paja de cáñamo aumenta la acumulación de zinc, selenio y hierro (Kala et al., 2025).

Aprovechamiento de residuos de banano

El aprovechamiento biotecnológico de los residuos de banano ha sido investigado en distintas localidades y finalidades. Sus aplicaciones se han dirigido a fines textiles, alimentarios, ecológicos e industriales (Romero *et al.,* 2024). Collazos y Pinzón (2022) alineándose con la economía circular, proponen el uso de un desfibrado del pseudotallo para obtener fibra textil, señalando esta alternativa como una opción viable. La producción de bioplásticos biodegradables también ha sido un foco de acción; procesos de delignificación enzimática por enzimas hidrolíticas de un cultivo de *Phanerochaete chrysosporium* han permitido la producción de polímeros moldeables (Jiménez, 2017).

Las hojas del banano son el residuo de la planta con más aplicaciones reportadas. Son apreciadas en la gastronomía de varios países como en Malasia, México, Ecuador, Perú, India, entre otros. Se usan como un recipiente hermético protector en la cocción al vapor, valorado por aportar sabores y olores derivados de su composición natural. Su uso ha sido investigado para la producción de *Volvariella volvacea* y *Pleurotus ostreatus,* dos especies de hongos valoradas igualmente en la gastronomía. (Haq *et al*., 2011; Morales et al., 2024; Obodai *et al.*, 2003).

Es importante aclarar que no se pueden aprovechar todos los residuos producidos durante el cultivo en ninguna de las aplicaciones descritas. La presencia de contaminantes químicos, como pesticidas, o la pudrición temprana de la materia orgánica impiden su uso en muchos casos (Morales *et al.,* 2024).

Residuos de banano para crecimiento de hongos

Los residuos de banano han sido poco explorados para el crecimiento de hongos destacando su investigación enfocada especialmente a las hojas de la planta (Haq *et al.*, 2011). Según el estudio de Obodai *et al.* (2003), las hojas de banano muestran ser un sustrato adecuado para el crecimiento y rendimiento del hongo *Pleurotus ostreatus* (Hongo Ostra). Se observó un crecimiento completo a los 34 días con una densidad de micelio uniforme y blanca. Los cuerpos fructíferos comenzaron a brotar 4 días

después de la apertura de la bolsa de cultivo finalizando con un rendimiento de 111,46 g de hongos frescos por cada kilogramo de sustrato húmedo, distribuido en un total de tres cosechas.

Otros estudios han sido realizados con *Volvariella volvacea* (Hongo de paja de arroz), se analizó su calidad nutricional tras cultivarse y cosechar sus cuerpos fructíferos en sustratos a base de hoja de banano. El análisis proximal revelo que su composición era 23,92% de proteína, 3,7% de nitrógeno, 7,88% de fibra cruda, 6% de contenido de cenizas y una humedad del 88%. La característica principal reportada derivada del uso de estos residuos es la elevada cantidad de nitrógeno que aportan (Haq et al., 2011).

Propiedades bioactivas investigadas de *Hericium erinaceus*

Li *et al*. (2012) reportaron que los extractos obtenidos a partir del cuerpo fructífero de *H. erinaceus* tienen una fuerte capacidad para inhibir las enzimas acetilcolinesterasa (AChE) y butirilcolinesterasa (BChE). Esta característica ha sido de interés científico para tratar enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer. De manera similar, se documentó un efecto antiproliferativo sobre la línea celular de cáncer de pulmón A549, mostrando su máxima capacidad cuando la concentración del extracto alcanzaba los 200 µg/mL (Sevindik *et al.*, 2024).

Frente a microorganismos resistentes a antibióticos como *Staphylococcus aureus* (incluyendo la cepa resistente MRSA) y otros hongos del género *Candida* fue altamente efectivo para inhibir su crecimiento desde concentraciones de 25 µg/mL (H. Li et al., 2012).

Otros autores como Liu et al. (2026), sugieren propiedades antidiabéticas por la capacidad que tienen los extractos de melena de león para inhibir las enzimas α-amilasa y la α-glucosidasa, ambas pertenecientes al metabolismo de los carbohidratos. Para demostrarlo se estudió la concentración inhibitoria 50 (IC50), siendo 0,0135 mg/mL para la α-amilasa (similar al fármaco acarbosa) y 130,3 mg/mL para la α-glucosidasa.

Contenido de fenoles en *Hericium erinaceus*

En un estudio realizado por Li et al. (2012) el análisis completo de fenoles en *Hericium erinaceus* se cuantificó valores de fenoles totales entre 11,23 y 35,18 mg equivalentes a ácido ferúlico (FAE) por cada gramo de peso seco (PS) del cuerpo fructífero (mg FAE/g PS). Además, se determinó que el ácido ferúlico era el compuesto fenólico predominante en los extractos que obtuvieron, en menor medida se detectó el ácido 4-hidroxibenzoico, el ácido siríngico, el ácido 4-cumárico y el ácido α-resorcílico.

En investigaciones recientes se ha incursionado por el uso de sistemas de extracción con Soxhlet optimizados por inteligencia artificial. Los resultados obtenidos de las simulaciones arrojaron que la temperatura óptima para la extracción es de 60,7 ℃, el tiempo de extracción 7,8 horas y una concentración de masa seca por unidad de solvente de 1,98 mg/ml. Esta optimización resultó en un contenido de 59,75 $\pm$ 1,82 mg Equivalente de ácido gálico (EAG)/g PS (Sevindik *et al.*, 2024).

Para obtener extractos con el mayor rendimiento y de forma rápida se ha investigado el uso de la extracción asistida por ultrasonido. Se reportó que las condiciones de extracción óptimas era una relación 1:56,71 g/ml de solvente (etanol 44,64%) y un tiempo de extracción de 56,58 minutos. Con esta metodología se logró un rendimiento de extracto crudo de polifenoles totales del 0,9985%; es decir 0,9985 gramos por cada cien gramos de PS (Liu et al., 2026).

Capacidad antioxidante en *H. erinaceus*

Investigaciones previas utilizaron cepas de *Hericium erinaceus* de 4 regiones de Turquía para evaluar la capacidad antioxidante por el método FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power), usando como base aserrín de roble. A cada formulación se le añadieron residuos agroindustriales, salvado de trigo como control y cáscara de semilla de algodón y orujo de oliva como objetos de estudio. Los resultados obtenidos oscilaron entre 1,76 y 4,92 equivalentes de trolox (ET) por gramo de peso fresco y tuvieron una correlación positiva con la concentración de fenoles totales (r=0,936) (Atila *et al.*, 2018)

Chutimanukul *et al.* (2023) evaluaron el efecto de la suplementación del sustrato a base de aserrín de caucho con harina de soya a través del método de capacidad antioxidante DPPH (2,2-difenil-1- picrilhidrazilo). Como resultado, se concluyó que existe una relación entre la cantidad de nitrógeno adiciona y la producción de compuestos fenólicos. El contenido de polifenoles a su vez tiene una relación directa con el incremento de la actividad antioxidante.

La capacidad antioxidante de los extractos de la fracción de polisacáridos sobre ensayos in vitro en células intestinales epiteliales de porcino IPEC-J2 arrojaron resultados interesantes. A estas células se les indujo a apoptosis con estrés oxidativo con peróxido de hidrógeno (H_2O_2), se pudo observar que las especies reactivas de oxígeno se eliminaron progresivamente con la administración del extracto de *H. erinaceus* purificado. Esto muestra un efecto protector de los compuestos presentes en las extracciones acuosas de melena de león (Kostanda *et al.*, 2024; J. Li *et al*., 2024).

En los ensayos optimizados por inteligencia artificial de Sevindik *et al.* (2024), los extractos obtenidos a través de Soxhlet a partir de 1,98 mg de peso seco por cada ml de etanol 80% mostraron un gran potencial antioxidante. Tras realizar los ensayos con DPPH y FRAP se alcanzaron valores de 73,36 mg ET/g PS y 107,66 mg ET/g PS respectivamente. Su investigación demuestra el potencial que tiene *H. erinaceus* como un alimento funcional contra los radicales libres y oxidantes.

Marco teórico

Producción bananera en Ecuador

La producción bananera en Ecuador es el pilar económico más importante en el sector agrario; representa alrededor del 35% del Producto Interno Bruto (PIB) agrícola y un 2% del PIB general. Esto se refleja en que un 17% de la población ecuatoriana se ve beneficiada de forma directa o indirecta de este sector, el cual genera empleo para más de un millón de personas (Ministerio de Comercio Exterior, 2017).

Desde 1952 Ecuador se encuentra consolidado como primer exportador de banano a nivel mundial gracias a las condiciones climáticas favorables que posee, que a diferencia de otros países productores carece de huracanes (Elbehri et al., 2015). La importancia del banano en Ecuador es tal que esta industria generó ingresos no petroleros por exportaciones cerca de 3700 millones de dólares en el año 2023 (Corporación Financiera Nacional B.P., 2024).

Figura 1

Producción de residuos agroindustriales derivados del cultivo de banano a nivel provincial.



Nota. Obtenido de Atlas bioenergético de la República del Ecuador (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable *et al.,* 2014).

Desde una perspectiva geográfica, el cultivo está focalizado de forma intensiva en las provincias de Los Ríos, Guayas y El Oro, que en conjunto sumaron el 74% de la producción nacional total del año (Corporación Financiera Nacional B.P., 2024). La alta demanda desemboca en una producción masiva de residuos de banano en estas zonas del país como se puede observar en la Figura 1. Cabe destacar que la producción de banano en Ecuador se compone principalmente por pequeños y medianos productores,

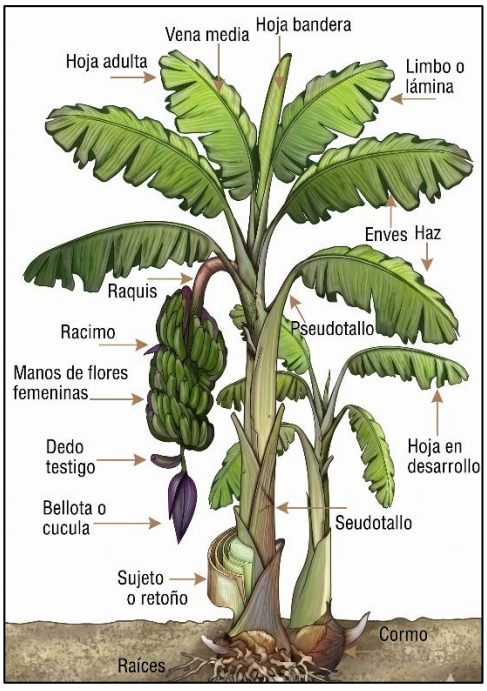
los cuales representan el 95,6% del total del sector, impulsando el modelo de economía familiar y Economía Popular y Solidaria (Ministerio de Comercio Exterior, 2017).

Generación de residuos lignocelulósicos del banano

Los residuos de banano son uno de los residuos agroindustriales más voluminosos generados en el mundo. Se estima un total de 114 millones de toneladas de biomasa residual a nivel global, ya que menos del 40% de toda la materia orgánica es aprovechada. El resto de esta materia orgánica se distribuye entre raquis, pseudotallo (tallo falso), hojas y frutos rechazados y suele ser desechada por pertenecer a la parte no comercial de la planta (Figura 2) (Yasin *et al.*, 2025).

Figura 2

Morfología de la Planta de Banano (Musa spp.)



Nota. Adaptado de "Usos de la hoja de plátano (*Musa paradisiaca L*.) en la gastronomía", por Morales *et al*., 2024, Gastronomía y Cocina, 3(1).

Lo descrito anteriormente se traduce en que por cada tonelada de banano producida destinada a la alimentación, se genera entre 2,5 y 4 toneladas del pseudotallo fresco, 150 kg de raquis, 480 kg de

hojas y 100 kg de frutos de rechazo que no ha cumplido con los estándares de calidad para exportación (Yasin *et al.*, 2025).

La acumulación ineficiente de cada uno de estos residuos provoca que por hectárea se produzcan entre 60 y 220 toneladas frescas de biomasa no aprovechable. A causa de esto, se produce una pérdida de nutrientes del suelo, sitios de proliferación de plagas, malos olores y emisión de gases de invernadero (como el metano producido por su descomposición descontrolada) (Romero *et al.*, 2024).

Características lignocelulósicas de los residuos de banano

La composición de los residuos de banano ha sido ampliamente investigada y reportada por varios autores y estos valores se han resumido en (Tabla 1 y 2). Estos residuos están conformados principalmente por pseudotallo, hojas, raquis y las cáscaras, que tienen una composición química compleja formada por polímeros estructurales, que les podría posicionar como un recurso a nivel industrial (Yasin *et al.*, 2025).

Tabla 1

Contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa de los residuos lignocelulósicos del cultivo de banano, en base seca

Residuo de banano	Lignina (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)
Hojas	8,5	36,3	27,39
Pseudotallo	5,2	35,3	24,9
Raquis	9,85	30,6	15,7

Nota. Información obtenida de (Paredes y Álvarez, 2010).

La cáscara del banano específicamente posee proporciones significativas de celulosa (6-15%), de hemicelulosa (6,4-20%), lignina (6-12%,) y una considerable porción de pectina (10-21%), esta última como un cementante en las paredes celulares de la planta (Yasin *et al.*, 2025). En cambio, el pseudotallo que representa cerca del 60% de la biomasa total, destaca por tener un 92% de agua, y un 3% en fibra aprovechable, caracterizado de igual forma por una alta cantidad de celulosa y almidón que le confiere estructura y resistencia (Collazos y Pinzón, 2022).

El raquis posee valores de hasta 54,46% de fibra detergente neutra, mientras que en el vástago, la lignina alcanza valores entre 5,79% y 6,81% dependiendo de la variedad de Cavendish que se esté analizando, lo que se relacionó con una variabilidad del material según el origen genético que haya tenido (Vera *et al.*, 2021).

Tabla 2

Contenido de nitrógeno en los residuos de banano reportados en literatura

Tipo de residuo	Cantidad de nitrógeno	Fuente
Raquis	0,64%	(Palacios, 2016)
Pseudotallo, laminas exteriores	0,03%	
Pseudotallo, zona central	0,28%	
Hojas	2,20%	
Nervaduras	0,53%	
Cáscara de plátano. *Musa acuminata Colla*	344,79 mg/100g	(Yasin et al., 2025)
Pulpa de la fruta. *Musa acuminata Colla*	273,88 mg/ 100g	
Cáscara de plátano. *Musa (Grupo AAB) 'Silk Fig'*	397,5 mg/100g	

Nota: Se puede observar que la zona con mayor concentración de nitrógeno es la correspondiente a las hojas de banano.

Biotecnología ambiental y economía circular

La economía circular es un modelo restaurativo y regenerativo que tiene como principal objetivo mantener los materiales, productos y componentes en su máxima utilidad y valor en todo momento. Se diferencia del modelo convencional de extraer, fabricar y desechar usado regularmente. Para este fin, se distingue entre ciclos técnicos y biológicos para cerrar los flujos de recursos (Geisendorf y Pietrulla, 2017; Webster, 2021).

La biotecnología ambiental es una disciplina fundamental que generalmente usa los principios de la economía circular y biología para detoxificar y eliminar contaminantes de los ecosistemas. Hace uso de microorganismos, plantas, enzimas y procesos bioquímicos para limpiar sitios contaminados, disminuir biomasa recalcitrante de forma eficaz y recuperar la salud ecológica (Gu, 2020).

En relación con este planteamiento, la biotecnología fúngica se posiciona como una herramienta de economía circular poderosa. Biotransformar residuos agroindustriales lignocelulósicos a través de su maquinaria molecular interna puede reciclar y producir elementos de alto valor como la nanocelulosa, biogás, compost, bioetanol, hidrógeno, alimentos, entre otros (Dhiman *et al.*, 2024).

Hongos comestibles y medicinales

Los hongos comestibles son aprovechados por al menos 80 países para su uso alimenticio y económico. China es líder de su producción llegando a producir a millones de toneladas por año, mientras que el resto de países competidores llegan a cientos de miles toneladas (Tabla 3) (Boa, 2005).

Este tipo de hongos abundan en el mundo con más de 1100 especies conocidas hasta el momento, muchos de estos se caracterizan por poseer propiedades medicinales de interés. Algunos ejemplos reconocidos son *Pleurotus ostreatus* relacionado con un efecto hipocolesterolémico, *Lentinula Edodes* y *Creolophus cirrhatus* pueden generar una acción hipotensiva, una combinación de *Grifola Frondosa, Pleurotus eryngii* y *Hericium Erinaceus* pueden tener un efecto antihipertensivo y reducir los lípidos en sangre (Boa, 2005; Rauf *et al*., 2023).

Muchos hongos comestibles han sido investigados con gran interés por propiedades anticancerígenas, antioxidantes, antivirales, inmunomodularas, antidiabéticas, etc. Esto supone un agregado por encima de la consideración general de considerarlos solo alimentos, especialmente cuando se conoce que en ensayos in vitro han demostrado actividad antitumoral y antineoplásica, en tipos de cáncer que afectan a millones de personas como el cáncer de mama (Figura 3) (Gariboldi *et al.*, 2023).

Figura 3

Hongos comestibles estudiados por efectos nutricionales y anticancerígenos en el cáncer de mama.



Nota. Tomado de (Gariboldi *et al.,* 2023).

Tabla 3

Top 10 de países productores de hongos comestibles y medicinales en el mundo

País	Producción (en toneladas)
China continental	41 117 736,71
Japón	469 046,11
Polonia	378 800
Estados unidos	343 820
Países bajos	260 000
India	243 000
España	163 800
Canadá	137 796
Federación Rusa	110 976,96
Francia	99 110

Nota. Información adaptada de (Rauf *et al*., 2023).

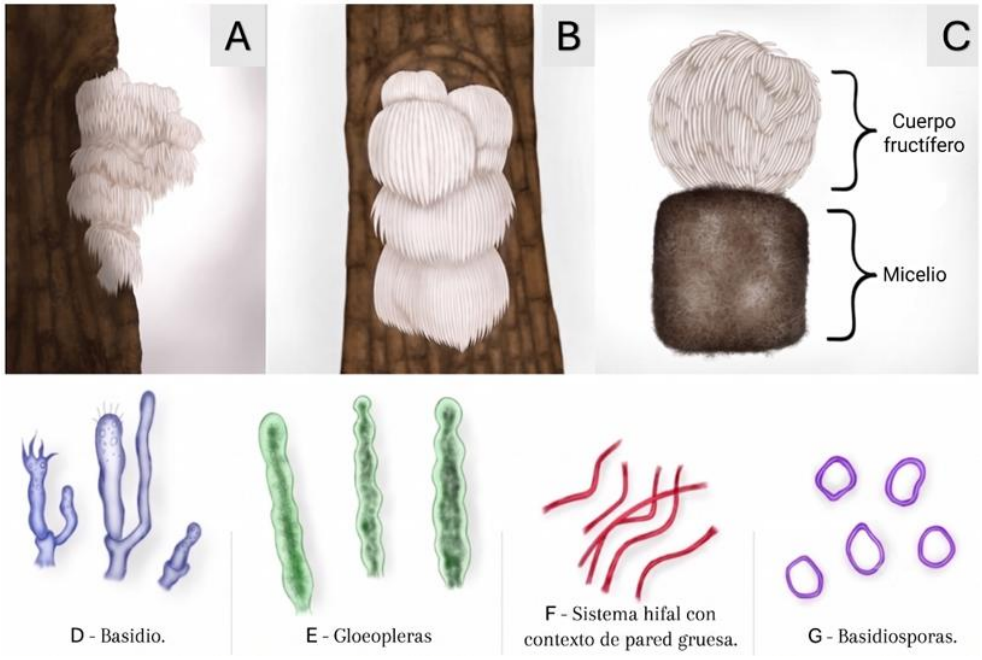
En China se mueven millones de dólares gracias a la comercialización de este tipo de hongos, aunque se destaca que no solo son productos de interés comercial para la exportación o suplementación, sino también en muchos lugares del mundo como países de África central son elementos nutritivos de supervivencia contribuyendo considerablemente a su dieta (Boa, 2005).

Biología de Hericium erinaceus

H. erinaceus es un hongo saprótrofo y parásito de tipo facultativo que crece sobre árboles de madera dura como: Roble, haya, arce, nogal y abedul. Su distribución natural está en zonas templadas de América del Norte, Europa y Asia. Este hongo tiene una morfología peculiar diferente a otros miembros de los hongos comestibles y medicinales comunes (Figura 4). Tiene un cuerpo globular de un color blanco a amarillo crema, con espinas con un tamaño entre 1 y 5 cm y esporas con un tamaño de 5-7 x 4-5 μm (Contato y Conte-Junior, 2025). Su clasificación científica lo sitúa en el filo *Basidiomycota*, que comprende numerosas especies con importancia ecológica, alimentaria y medicinal (Tabla 4).

Figura 4

Morfología y crecimiento de Hericium erinaceus



Nota. A: Vista lateral del cuerpo fructífero; B: Vista frontal del cuerpo fructífero; C: Cuerpo fructífero y micelio de *H. erinaceus*; D: Basidio; E: Hifas gloeopleras; F: Sistema hifal con contexto de pared gruesa; G: Basidiosporas. Tomado y traducido de Alsoufi *et al*. (2025).

Tabla 4

Clasificación científica del hongo melena de león (Hericium erinaceus).

Nivel	***Clasificación***
Reino	*Fungi*
Filo	*Basidiomycota*
Clase	*Agaricomycetes*
Orden	*Russulales*
Familia	*Hericiaceae*
Género	*Hericium*
Especie	*Hericium erinaceus*

Nota. Información tomada de (Boddy *et al*., 2011)

Cultivo de Hericium erinaceus

Su cosecha de sus zonas de crecimiento naturales esta estrictamente prohibida ya que se encuentra en peligro de extinción debido al abuso de su recolección. Por esto se ha optado por un método de cultivo basado en estacas de madera que se colocan en regiones establecidas de bosques con árboles de madera dura, procedimiento que puede demorar de 1 a 2 años para obtener cuerpos fructíferos en gran escala (Boddy et al., 2011; Contato y Conte-Junior, 2025).

A nivel productivo comercial e investigativo puede crecer en medios de cultivo líquido (crecimiento en pocos días) o bolsas de fermentación en estado sólido (crecimiento entre 1 y 2 meses), métodos enfocados a optimizar y estandarizar el crecimiento y producción de metabolitos secundarios (Contato y Conte-Junior, 2025). Estas estrategias de cultivo *in vitro* buscan optimizar la eficiencia biológica con el manejo adecuado de la temperatura, pH y tipo de sustrato tal como se ve en la Tabla 5.

Compuestos bioactivos de Hericium erinaceus

Hericium erinaceus tiene una gama de compuestos bioactivos de interés, estos tienen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, neuroprotectoras y promotoras de la neurogénesis. Esta característica le ha dado un lugar en las investigaciones que busquen disminuir trastornos depresivos y aumentar la concentración en quienes lo consumen en sus diversas presentaciones (Chong et al., 2019).

Tabla 5

Sustratos y condiciones de cultivo utilizados para Hericium erinaceus en investigaciones

Sustrato	pH	Temperatura Óptima	Eficiencia Biológica (%)	Autores
Paja de arroz (16,3%) y zuro de maíz (59,7%) con salvado de trigo (20%)	-	Micelio: 25 °C, Fructificación: 15 - 18 °C	89,14%	(Lu et al., 2024)
Aserrín de roble suplementado con cáscaras de semilla de algodón (7:3)	-	Micelio: 25 ± 2 °C, Fructificación: 20 ± 2 °C	Hasta 44,4%	(Atila et al., 2018)
Aserrín de madera de caucho (100%)	Inicial: 6,70, Final: 4,79	Micelio: 20 °C, Fructificación: 16 °C	42,61%	(Chutimanuku et al., 2023a)
Aserrín de roble y salvado de trigo (8:2)	Inicial: 4,37, Final: 4,01	Micelio: 25 °C, Fructificación: 15 °C	14,4% - 37,3%	(Atila, 2019)
Aserrín de madera de caucho y harina de soja (76:4)	Inicial: 7,77	Fructificación: 20 ± 2 °C	35,60%	(Chutimanukul et al., 2023b)
Paja de cáñamo (55%) y salvado de trigo (45%) Aserrín de haya (55%) y salvado de trigo (45%)	-	Micelio: 23 ± 2 °C Fructificación: 20 °C	-	(Kala et al., 2025)

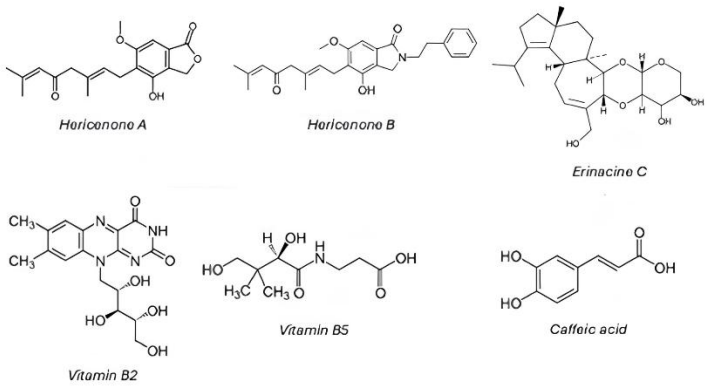
Las erinacinas son compuestos diterpenoides únicos con actividad neuroactiva que se encuentran en el micelio de *Hericium erinaceus*, mientras que las hericenonas son meroterpenoides que se encuentran exclusivamente en el cuerpo fructífero. Estos dos grupos de compuestos son los que más han llamado la atención científica por su capacidad de actuar en la estimulación de la producción del factor de crecimiento nervioso (NFG) tras atravesar la barrera hematoencefálica (Doar *et al*., 2025; Szućko-Kociuba *et al.*, 2023).

La capacidad antioxidante de deriva justamente de las herinacinas, ericenonas y otros polifenoles (ácido gálico, cafeico y p-cumárico) (Figura 5). Estos atrapan radicales libres de oxígeno lo

que previene estrés celular y daño oxidativo a lípidos, proteínas y ADN, evitando así el riesgo de enfermedades crónicas (Contato y Conte-Junior, 2025).

Figura 5

Compuestos bioactivos presentes en la biomasa de Hericium erinaceus



Nota. Tomado de Contato y Conte-Junior (2025).

Estrés oxidativo y antioxidantes

El estrés oxidativo es causado por especies reactivas de oxígeno (ROS) que incluyen al anión superóxido O_2^-, radical hidroxilo $OH\cdot$ y oxígeno singlete $^1O_2$. Un desequilibrio entre ROS y antioxidantes del organismo se daña biomoléculas importantes para la supervivencia (lípidos, proteínas, ácidos nucleicos y carbohidratos), provocando disfunción mitocondrial, envejecimiento celular y el desarrollo de más de 100 enfermedades como el cáncer, la diabetes y trastornos cardiovasculares (Baek y Lee, 2016; Gulcin, 2020).

A nivel biológico se conoce que el estrés crónico altera varios mecanismos moleculares que convergen hacia la producción de ROS. Estos compuestos han sido relacionados con un desequilibrio hormonal prolongado dirigido hacia la producción de glucocorticoides que en sobreexposición daña las neuronas, reducen los niveles de factores neurotróficos lo que disminuye la neurogénesis y la plasticidad sináptica (Baek y Lee, 2016).

En respuesta a los ROS existen los antioxidantes, que se definen como sustancias que a bajas concentraciones tienen la capacidad de retrasar o inhibir de forma significativa la oxidación de un sustrato oxidable (Gulcin, 2020). Pueden dividirse en dos grupos, los sintéticos y los naturales; los sintéticos han sido utilizados únicamente como herramienta de investigación, debido a que en animales se han observado efectos tóxicos y carcinogénicos (Baek y Lee, 2016; Gulcin, 2020).

Por otro lado, los antioxidantes naturales se dividen en enzimáticos y no enzimáticos, el primer grupo se refiere al grupo de proteínas con actividad catalítica capaz de actuar sobre las ROS, ejemplo de esto se encuentran la catalasa y el superóxido dismutasa. Mientras que los no enzimáticos incluyen varios grupos de compuestos, entre los más representativos están los ácidos fenólicos, flavonoides y vitaminas (Gulcin, 2020; Munteanu y Apetrei, 2021).

Métodos de evaluación antioxidante

Los métodos de evaluación antioxidante son importantes en la industria alimenticia, médica y farmacéutica, debido al papel clave de los antioxidantes en la neutralización de radicales libres. Estos se dividen principalmente en tres tipos de ensayos según su mecanismo de acción: Los ensayos basados en la transferencia de un átomo de hidrógeno (HAT), ensayos basados en la transferencia de un solo electrón (SET) y los ensayos de modo mixto (HAT/SET) (Munteanu y Apetrei, 2021).

El fundamento de los HAT se basa en la capacidad de un antioxidante para neutralizar radicales libres por la donación de un átomo de hidrógeno. Entre estos se ensayos se destaca ORAC (Capacidad de Absorción de Radicales de Oxígeno), HORAC (Capacidad Antioxidante contra Radicales Hidroxilo), TRAP (Parámetro Antioxidante de Atrapamiento de Radicales Peroxilo Total) y TOSC (Capacidad de Escaneo de Oxirradicales Totales) (Gulcin, 2020; Munteanu y Apetrei, 2021).

Los ensayos SET detectan la capacidad de un antioxidante para donar un electrón y reducir metales, grupos carbonilos o radicales, la limitación de estos ensayos es la dependencia del pH. Los métodos más comúnmente utilizados son CUPRAC (Poder Antioxidante Reductor Cúprico), FRAP (Poder

Antioxidante Reductor Férrico) y el método de Folin-Ciocalteu que sirve principalmente para la detección de la concentración total de fenoles (Gulcin, 2020).

Los HAT/SET involucran mecanismos tanto de transferencia de hidrógenos como de electrones en proporciones variables, que dependen de las condiciones del pH y solvente. Los métodos usados en este caso son el de ABTS (acido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) y DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo), ambos usados como el estándar en gran cantidad artículos científicos por la simplicidad que conllevan (Gulcin, 2020; Munteanu y Apetrei, 2021).

Marco conceptual

Variables de control en el cultivo de hongos comestibles

Relación C:N en sustratos

La relación carbono/nitrógeno permite estimar la cantidad de nitrógeno que tendrá disponible un organismo de acuerdo a una cantidad de masa de materia orgánica consumida. Una relación C/N alta puede mejorar el desarrollo de los hongos comestibles, pero si se excede los valores recomendados puede llegar a inhibir la síntesis de compuestos bioactivos o la fructificación (Assan y Mpofu, 2014).

Humedad

Se define como la cantidad de agua contenida en relación al total de la masa, pudiendo ser superficial si se elimina fácilmente con el aire o inherente si necesita temperaturas superiores a los 100 ^{o}C para eliminarse y alcanzar un peso constante (Palacios, 2016). En el caso particular del cultivo de hongos esta característica es necesaria para el crecimiento y desarrollo del mismo.

Fotoperiodo

El fotoperiodo es la cantidad de tiempo que un animal, planta u hongo recibe luz en el día. Es importante en un cultivo fúngico debido a que es un estímulo para la formación de primordios y la dirección de crecimiento de los cuerpos fructíferos (Chutimanukul *et al.,* 2023b).

Parámetros de crecimiento Micelial y fisiología Fúngica

Los parámetros cinéticos del crecimiento micelial son aspectos analizados para comprender el correcto avance del desarrollo fúngico. Estos se expresan en la cantidad de días necesarios para completar cada etapa de crecimiento, permitiendo que se pueda entender de mejor manera los efectos del sustrato sobre la fisiología fúngica del hongo que se esté analizando (Ayala, 2024).

Tiempo de colonización

El tiempo de colonización necesario para colonizar el 50% y el 100% permiten entender la facilidad que tiene el micelio para colonizar y aprovechar el sustrato donde se encuentra creciendo. Una menor cantidad de días necesarios para colonizar el sustrato significa los nutrientes y la fuente de carbono es más fácil de metabolizar para el hongo. Los sustratos ricos en azúcares simples, polímeros de baja complejidad, mejor compactados y con un menor requerimiento de oxígeno para metabolizarse dan mejores resultados (Assan y Mpofu, 2014; Ayala, 2024).

Tiempo de fructificación

El tiempo de aparición de primordios y el tiempo necesario para obtener cuerpos fructíferos de calidad comercial (generalmente cuando las espinas alcanzan de 1 a 5 cm de largo) permite observar si las relaciones C:N y lignina/celulosa no afectan el desarrollo sexual del hongo. Tiempos más largos indican que la fructificación puede verse inhibida (Atila *et al.*, 2018).

Índices de Rendimiento y Bioconversión de la Biomasa

Eficiencia biológica

Es una medida estándar para determinar la cantidad de producto que se puede obtener en la fructificación dependiendo la cantidad de sustrato utilizado. Relaciona el peso fresco del cuerpo fructífero con respecto la cantidad de sustrato seco utilizado en porcentaje y de esta manera estimar los rendimientos de las cosechas futuras siguiendo los mismos protocolos (Ayala, 2024).

Parámetros Analíticos de la Capacidad Antioxidante

Concentración inhibidora de radical 50

Es la concentración necesaria de un extracto o biomasa de seca para inhibir la mitad de la concentración conocida de un radical a través de mecanismos de donación de electrones o hidrógenos por parte de los compuestos antioxidantes. Un IC50 bajo representa que los compuestos presentes tienen un alto potencial antioxidante mientras que uno alto representa un bajo potencial antioxidante (Gulcin, 2020).

Concentración equivalente a Trolox

El trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilicromano-2-carboxílico) es un compuesto antioxidante sintético e hidrosoluble que funciona como un análogo de la vitamina E (alfa-tocoferol). Al carecer de la larga cola hidrofóbica de la vitamina E, es soluble en agua y solventes polares, lo que lo convierte en el estándar de referencia universal en ensayos químicos para medir la actividad antioxidante (Prior *et al.*, 2005). La capacidad antioxidante de una muestra no se mide de forma aislada, sino comparándola directamente con el trolox. Los resultados se expresan en μmol de Equivalentes de Trolox por gramo de muestra (μmol TE/g), esto indica cuántos micromoles de Trolox puro se necesitarían para igualar la capacidad de atrapamiento de radicales libres que tiene un solo gramo de extracto o biomasa (Prior *et al.*, 2005).

Concentración equivalente a ácido gálico

El ácido gálico (ácido 3,4,5-trihidroxibenzoico) es un ácido fenólico secundario que se encuentra de forma natural en una amplia variedad de plantas, hojas y frutos. En el ámbito del análisis fitoquímico, se utiliza como el estándar de referencia universal para la cuantificación de Fenoles Totales mediante el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu, debido a su alta pureza, estabilidad y respuesta lineal predecible (Prior *et al.*, 2005). Indica cuántos miligramos de ácido gálico puro tendrían la misma capacidad reductora frente al reactivo de Folin-Ciocalteu que un solo gramo de extracto seco o biomasa.

Capítulo III

Metodología

Enfoque de investigación

La presente investigación se llevó a cabo bajo un enfoque cuantitativo, a causa de que se orienta a la recolección y posterior análisis de datos numéricos con la finalidad de arrojar conclusiones acerca de los efectos en el crecimiento y desarrollo del hongo *Hericium erinaceus* bajo un cambio de sustrato suplementado con residuos de banano. Este enfoque permite medir características de interés para la producción del hongo sujeto a investigación mediante la aplicación de pruebas estadísticas, permitiendo así una organización, tabulación e interpretación clara y objetiva de la información obtenida.

El enfoque cuantitativo se considera pertinente para la investigación, ya que posibilita evaluar la viabilidad de los residuos agroindustriales de banano como suplemento para el sustrato de *Hericium erinaceus* sin afectar su crecimiento y resultando de esta forma en una alternativa para valorizar esta materia prima.

Tipo y diseño de investigación

Tipo de investigación

Conforme el propósito del estudio, la investigación es de tipo explicativa, ya que busca determinar los efectos sobre el desarrollo y crecimiento de *Hericium erinaceus* debido al uso de residuos de banano como sustrato alternativo. Esto a través de la formulación del sustrato sólido estándar utilizado comúnmente. A través de este tipo de investigación, se busca describir qué cambios en el crecimiento y desarrollo del hongo de investigación se están presentando y explicar los posibles motivos de los cambios reportados.

Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es experimental, puesto que se manipularon deliberadamente las variables relacionadas con la formulación del sustrato y se observaron en condiciones controladas y reproducibles. Asimismo, el estudio presenta un corte longitudinal, ya que la recolección de datos se realizó en distintos momentos del crecimiento y desarrollo de *H. erinaceus*.

Materia prima

Sitio y método de recolección

Se recolecto material suficiente y representativo de pseudotallo y raquis, que se obtuvieron de comerciantes locales del Mercado Mayorista del Sector Sur de Quito, que obtienen su producto de Provincias del Guayas y los Ríos.

Se mezcló 50% del pseudotallo y 50% de raquis en peso, la mezcla se denominó en esta metodología como “residuos de banano” utilizado en las formulaciones planteadas. Para su uso se descartó las zonas exteriores, ennegrecidas o con signos de contaminación, se utilizó únicamente el material más fresco.

Preparación del sustrato

Los residuos de banano se seleccionaron procurando utilizar el material más fresco, este se lavó con agua caliente por 30 minutos. Posteriormente, se separó manualmente las fibras de los residuos de banano y luego se trituraron, una alícuota se llevó a secar a 70 ℃ para los ensayos de difusión radial, y el resto se utilizó en los ensayos de cultivo en bolsas. El material seco se pesó y se colocó en las placas Petri, mientras que el material fresco se pesó y se colocó en las bolsas de polipropileno autoclavables 150 µm de grosor (marca WeiWei) resistentes. Se mezcló con el correspondiente peso de aserrín, agua, yeso y salvado de trigo en cada tratamiento y se llevó a autoclavar por 15 minutos a 15 PSI y 121 ℃ (Autoclave EA-632 Trident Medical)(Lu *et al*., 2024).

Técnica e instrumento

Técnicas de evaluación del crecimiento micelial

Las técnicas utilizadas para evaluar el crecimiento micelial se enfocaron en la tasa de colonización completa en bolsas, donde se espera que el micelio haya colonizado visualmente al menos el 95% del sustrato y en la tasa de crecimiento radial promedio que se basa en una inoculación central en una placa Petri donde se encuentre distribuido de forma uniforme el sustrato, midiendo la distancia recorrida por el micelio en cuatro direcciones que formen una cruz, en los períodos de crecimiento durante 10 días según el protocolo utilizado por (Lu *et al*., 2024).

Técnicas de evaluación de biomasa

Para la evaluación de la biomasa se pesa con una balanza de precisión la cantidad de sustrato seco usado inicialmente y con una balanza de precisión se registra el peso fresco del cuerpo fructífero del hongo en cada unidad experimental. Se usó la eficiencia biológica para estimar la cantidad de producto obtenido en relación a la cantidad de sustrato, para calcularlo se divide la masa del cuerpo fructífero para el sustrato seco utilizado y se expresa en porcentaje (Fórmula 1) (Chutimanukul et al., 2023b).

$$\%Eficiencia\ biológica = \frac{Biomasa\ cuerpo\ fructífero\ (g)}{Sustrato\ seco\ utilizado\ (g)} * 100\% \quad (1)$$

Método de extracción

La extracción de compuestos antioxidantes se realizó siguiendo la metodología de (Chutimanukul et al., 2023b) con algunas modificaciones. Los cuerpos fructíferos obtenidos de cada tratamiento se sometieron a un secado a 40 ± 2℃ (estufa LAB-LINE Instruments Inc. modelo Imperial 31.05) para posteriormente ser procesados con un mortero de laboratorio. Se uso una relación 1:10 en relación peso en gramos de muestra y ml de solvente. Los solventes utilizados fueron etanol al 96%, etanol 70% y metanol-agua en una relación 1:1. La maceración se realizó 4 días en oscuridad para

finalmente ser sometido a ultrasonido por 10 minutos (Baño ultrasónico marca Ovan modelo ATM40-3LCD). El extracto obtenido fue filtrado con papel filtro Whatman No. 1 y almacenado a -20 ℃ en un frasco ámbar hasta su uso.

Contenido de fenoles totales

La metodología se basa en el protocolo establecido por Marcillo-Parra *et al*. (2021) a través de un ensayo de Folin-Ciocalteu modificado de Georgé *et al.* (2005). Del extracto crudo se diluyó en una proporción 1:5. Posteriormente se colocó 20 μL de muestra y 100 μL del reactivo Folin-Ciocalteu diluido previamente 4 veces, se incubó la mezcla por 2 minutos en agitación y se añadió 75 μL de una solución de carbonato de sodio (100 g/L). Se incubó a 25 ℃ por 2 horas para estabilizar el color azul. Finalmente se midió la absorbancia a 750 nm. La curva de calibración se realizó con concentraciones de ácido gálico anhidro (de 0 a 600 mg/L), las mismas que mostraron una linealidad satisfactoria dentro de la absorbancia obtenida ($R^2 > 0{,}99$). Los resultados se expresan en mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g de peso seco (PS).

Técnicas de evaluación antioxidante

La evaluación de capacidad antioxidante se realizó mediante un ensayo de actividad captadora de radicales a los extractos metanólicos de los tratamientos con *H. erinaceus.* Se usó el método de Chutimanukul et al. (2023b) con modificaciones, evaluando concentraciones entre 0 a 500 µM de trolox (disueltas en metanol:agua 80:20 v/v), se mezcló 20 µL de cada muestra y estándar con 180 µL de una solución de DPPH (≈150 µM) para dejar incubar durante 40 minutos en condiciones de oscuridad, para leer la absorbancia a 750 nm en un lector de microplacas. El porcentaje de inhibición se determinó con la Fórmula 2:

$$Inhibición\ (\%) = \left[1 - \frac{A_{Muestra} - A_{Blanco}}{A_{DPPH} - A_{Blanco}}\right] * 100\%\ (2)$$

Donde A_{DPPH} hace referencia a la absorbancia de la solución de DPPH, A_{blanco} a la absorbancia del solvente usado y $A_{Muestra}$ a la absorbancia de la solución con la muestra. La actividad antioxidante

se expresó a través de la concentración equivalente de trolox en umol/gramo seco. La curva de calibración se obtuvo con una linealidad correspondiente a un $R^2 > 0{,}99$. La lectura se realizó en un lector de microplacas marca Biotek modelo Sinergy H1.

Validación y confiabilidad del instrumento

Para mantener la confiabilidad de las mediciones se hizo uso de equipos con calibraciones frecuentes y vigentes, tratamientos con al menos tres repeticiones para disminuir el margen de error y obtener promedios estadísticos confiables, uso de protocolos establecidos en literatura científica publicada en revistas confiables y control de variables que pudieran afectar a los resultados obtenidos.

Consideraciones éticas

Las experimentaciones se llevaron a cabo teniendo en cuenta todas las medidas de bioseguridad exigidas dentro de los laboratorios del Departamento de Ciencias de los Alimentos y Biotecnología (DECAB-EPN). Al tratarse de una investigación de carácter biotecnológico ambiental se realizó el correcto tratamiento de esterilización y desecho de los materiales y materias primas utilizados a lo largo de la investigación previo a su disposición final para mitigar posibles efectos ambientales. Además, los resultados presentados se rigen por el deber científico de obtener datos verídicos y reproducibles, respetando también la propiedad intelectual a través de la correcta citación de todas las fuentes utilizadas.

Variables experimentales

Las variables experimentales se dividieron en tres grupos, las independientes que pertenecen a la formulación del sustrato, las dependientes que responden a factores de crecimiento o capacidad antioxidante y las controladas que son aquellas que pueden afectar en los resultados, pero no son necesarias para responder la pregunta de investigación por lo que se mantienen constantes en cada caso (Tabla 6 y 7).

Variables independientes

La variable independiente utilizada en esta investigación corresponde a una sustitución parcial del material de aserrín del sustrato por residuos de banano a partir de una formulación "Master Mix" estándar conocida por su eficiencia en el rápido crecimiento y buena eficiencia biológica de *Hericium erinaceus.* Este "Master Mix" se compone de un 77% aserrín de madera dura, 20% salvado de trigo, 2% yeso y 1% sacarosa similar a la formulación utilizada por Lu et al. (2024).

Variables dependientes

Las variables dependientes del estudio se centran mayoritariamente en los indicadores de crecimiento como crecimiento radial, tiempo de colonización de sustrato, tiempo de aparición de primordios y producción de biomasa, incluyendo también la capacidad antioxidante de los extractos obtenidos de cada tratamiento, siguiendo un ensayo basado en Chutimanukul et al. (2023b).

Tabla 6

Matriz de operacionalización de variables

Variable	Indicador	Unidad	Instrumento/Técnica
Crecimiento micelial	Velocidad de crecimiento radial	mm/día	Regla milimétrica
Crecimiento micelial	Tiempo de colonización al 50 %	días	Observación directa
Crecimiento micelial	Tiempo de colonización al 100 %	días	Observación directa
Producción de biomasa	Peso fresco	g	Balanza analítica
Producción de biomasa	Eficiencia biológica	%	Cálculo a partir del peso obtenido
Capacidad antioxidante	Capacidad antioxidante equivalente a trolox	µmol ET/gramo PS	Espectrofotométrico/DPPH
Fenoles totales	Equivalente a ácido gálico	mg EAG/100 g PS	Método de Folin-Ciocalteu

Variables controladas

Dado que Hericium erinaceus puede variar sus metabolitos dependiendo de las condiciones ambientales a las que se encuentre sometido, se optó por controlar variables importantes en el

crecimiento, pero no esenciales para responder a la pregunta de esta investigación tales como: Temperatura (22 ℃ colonización y 19 ℃ durante la fructificación), humedad (85% colonización y 90% fructificación), pH inicial del medio (6,5), fotoperíodo (nulo en colonización y 8 H diarias durante fructificación) al igual que el protocolo establecido por (Atila, 2019). Además, se mantuvo constante la cantidad de sustrato seco utilizado (200 g) y la cantidad de agua añadida al sustrato seco (300 ml).

Tabla 7

Resumen de las variables utilizadas en el diseño de la investigación

Tipo de variable		
Independiente	**Dependiente**	**Controlada**
- Porcentaje de reemplazo del aserrín por residuos de banano	- Crecimiento radial - Tiempo de colonización y fructificación del sustrato - Peso húmedo del cuerpo fructífero - Capacidad antioxidante	- pH inicial - Temperatura - Humedad - Fotoperíodo

Diseño experimental

El factor experimental utilizado fue el porcentaje de reemplazo de aserrín por residuos de banano en el sustrato de cultivo. Se tomo 4 diferentes niveles del factor (0%, 10 %, 20, 30%) y cada nivel constituye un tratamiento donde el nivel referencial o control corresponde a un reemplazo nulo. Las bolsas se recolocaron constantemente en diferentes sitios de la incubadora (marca HYSC) para minimizar el efecto de la posición sobre el crecimiento. De cada tratamiento se realizó 3 repeticiones lo que dio como resultado un total de 12 unidades experimentales.

Análisis estadístico

Para cada uno de los tratamientos elaborados resumidos en la Tabla 8, se obtuvieron datos correspondientes a tres réplicas biológicas (n=3), en los cuales se comprobó la normalidad con una prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas con una prueba de Levene. Posteriormente ANOVA de una vía para evaluar el efecto de la formulación del sustrato sobre las variables de respuesta.

Cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$), se empleó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey. Para este fin se utilizó el software InfoStat versión 2007 y Microsoft Excel 2021.

Tabla 8

Tratamientos utilizados en la experimentación

Tratamiento	***Aserrín (%)***	***Residuos (%)***	***Yeso (%)***	***Salvado de trigo (%)***	***Sacarosa (%)***	***Agua (ml)***
Tc	*77*	*0*	*2*	*20*	*1*	*300*
T1	*69,3*	*7,7*	*2*	*20*	*1*	*300*
T2	*61,6*	*15,4*	*2*	*20*	*1*	*300*
T3	*53,9*	*23,1*	*2*	*20*	*1*	*300*

Capítulo IV

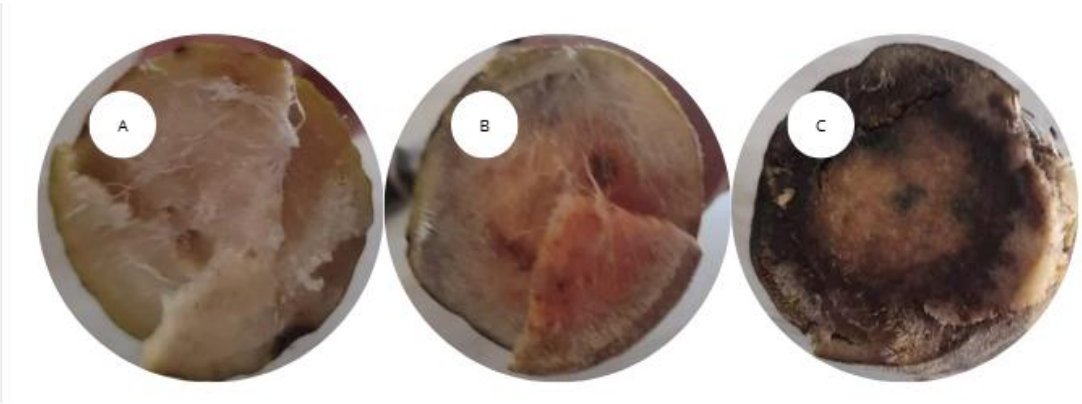
Análisis y discusión de los resultados

Recolección y selección de los residuos de banano

Se recolectó 58,5 kg de raquis y 40 kg de pseudotallo. Después de retirar las zonas externas, ennegrecidas, lastimadas y con color amarillento se redujo este peso a 24,2 kg de raquis y 29,2 kg de pseudotallo (Figura 6). De este material se obtuvo 40 kg de una mezcla 1:1 de pseudotallo y raquis dispuestos en pequeñas fibras. De esta mezcla 2,8 kg fueron utilizados para ensayos de crecimiento en bolsa y 1,2 kg fueron destinados a ensayos de crecimiento radial en cajas Petri, tras haber sido secados y esterilizados.

Figura 6

Cortes tomados del raquis de banano tras su recolección.



Nota. Los cortes que presentaban características de frescura y no degradación previa fueron utilizados tal como se observa en la imagen A y en menor medida B. Los que presentaban características de oxidación y posible infestación microbiana como en la imagen C se descartaron y fue un material no utilizado.

Del total de los residuos recolectados se consideró aprovechable el 41,36% del raquis y el 73% de pseudotallo. Estos resultados podrían mejorar si la selección y su aprovechamiento para el cultivo se

realiza a brevedad. Considerando que el transporte de este material involucraría costos adicionales, la producción adyacente de los grandes cultivos sería una alternativa más eficiente que llevarla a otros lugares del país. Un motivo válido para la movilización de estos recursos es si las condiciones climáticas son compatibles con la biología de *Hericium erinaceus* como lo es Quito que presenta temperaturas menores a las de la costa ecuatoriana.

Desempeño del crecimiento micelial en los distintos sustratos

Durante el período de crecimiento en placas Petri se logró observar que el crecimiento en los tratamientos fue significativamente diferente ($p < 0{,}001$), siendo que el grupo control fue el de menor crecimiento (2,51 mm/día) y el tratamiento con 30% de reemplazo (T3) con residuos de banano fue el de más rápido crecimiento (3,04 mm/día) tal como se muestra en la *Tabla 9*.

Tabla 9

Resultados del ensayo de crecimiento radial realizado en cajas Petri

Tratamiento	Crecimiento radial (mm/día)*
Tc	$2{,}51 \pm 0{,}040^{A}$
T1	$2{,}83 \pm 0{,}061^{B}$
T2	$2{,}86 \pm 0{,}075^{B}$
T3	$3{,}04 \pm 0{,}046^{C}$

Nota. Medias con una letra similar no son significativamente diferentes (p > 0,05). Promedio + DE (n=3)*

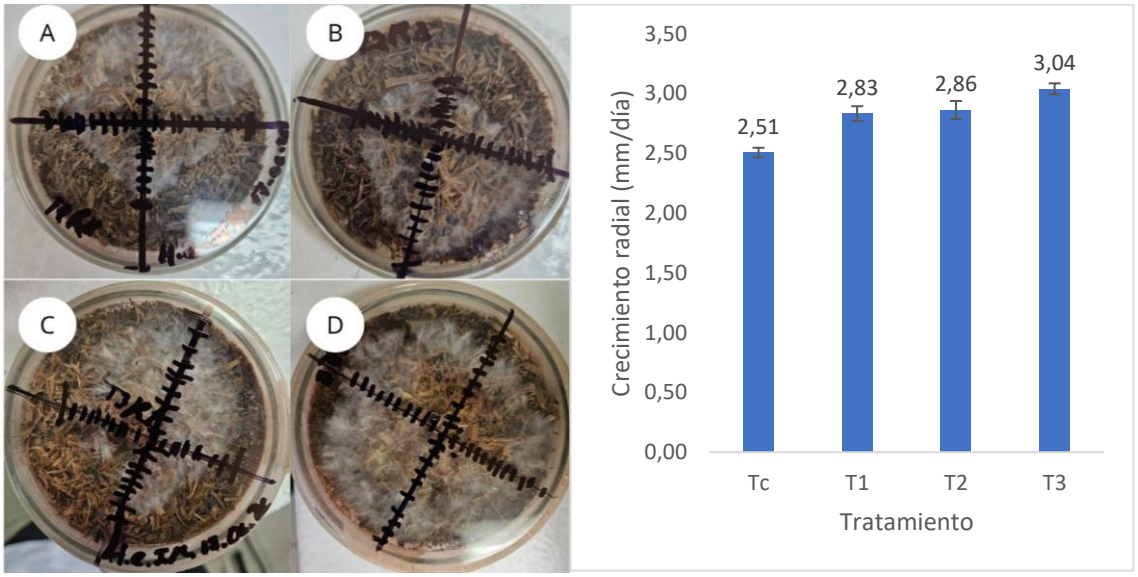
Se determinó un incremento lineal y progresivo de la velocidad de crecimiento radial a medida que aumentó el porcentaje de residuos de banano en la formulación, alcanzando la tasa máxima en el tratamiento T3 con un promedio de $3{,}04 \pm 0{,}046$ *mm/día (Figura 7)*.

Este comportamiento acelerado del micelio puede explicarse mediante la asimilación selectiva de las fuentes de carbono poliméricas durante la fase lag y log del desarrollo hifal. *H. erinaceus* prefiere consumir hemicelulosa como fuente de carbono inicial durante la colonización temprana, postergando la degradación de la celulosa y la lignina recalcitrante para fases posteriores del ciclo vegetativo y reproductivo (Atila, 2019). Los residuos de banano, especialmente el pseudotallo, poseen una estructura

celular de madera suave sumamente rica en hemicelulosa (24,9% en base seca) y celulosa fácilmente accesible (35,3%) en comparación con las fibras compactas y altamente lignificadas del aserrín de madera dura tradicional (Paredes y Álvarez, 2010).

Figura 7

Resultados obtenidos del crecimiento radial en cajas Petri.



Nota. Las placas Petri son los resultados del cultivo A. Tc (0%) B. T1 (10%) C.T2 (20%) y D. T3 (30%). *Nota.* Se muestran los resultados como la media de los resultados obtenidos (n=3).

Este incremento en la tasa de extensión radial in vitro se correlacionó con una reducción significativa en el tiempo total de incubación y colonización del 50 y 100% del sustrato, en las bolsas de polipropileno de fermentación en estado sólido que se observan en Figura 8 y la Tabla 10. No obstante, los resultados obtenidos son menores a los reportados en literatura en diferentes sustratos.

Lu et al. (2024) en sus ensayos obtuvo velocidades de crecimiento radial mayores a las presentadas en este estudio, la de mayor crecimiento con $4{,}55 \pm 0{,}32$ mm/día fue una formulación a base de 16,3% paja de arroz y 59,7% zuro de maíz y la de menor crecimiento fue la de 100% zuro de maíz con $3{,}54 \pm 0{,}04$ mm/día. Esta diferencia podría deberse a diferencias entre las cepas de melena de león utilizadas, siendo que en su estudio se usó *H. erinaceus* 20190111, proporcionada por el Centro de

Investigación de Hongos Comestibles del Instituto de Investigación de Vegetales y Flores de la Provincia de Jilin, mientras que en este estudio se usó una de las pocas cepas comerciales llegadas al Ecuador.

Otro posible motivo de las diferencias entre resultados es la diferencia en la temperatura utilizada (22 ℃ en el presente estudio con respecto a 25 ℃ del estudio de referencia). Como demostraron (Atila et al., 2021), la temperatura juega un papel clave en el desarrollo de *Hericium erinaceus*, a mayor temperatura el crecimiento aumenta hasta llegar a una meseta donde este se ve inhibido por estrés o muerte. Para mejorar este aspecto se podría aumentar la temperatura para arrojar velocidades de crecimiento radial más altas, sujeto a la caracterización del rango de temperatura óptimo de la cepa que se utilice.

Tabla 10

Resultados obtenidos del tiempo necesario para la colonización del 50% del sustrato

Tratamiento	***Tiempo de colonización 50 (días)****
Tc	$19{,}33 \pm 1{,}53^{B}$
T1	$18{,}00 \pm 1{,}00^{AB}$
T2	$17{,}67 \pm 1{,}53^{AB}$
T3	$15{,}33 \pm 1{,}53^{A}$

Nota. Medias con una letra similar no son significativamente diferentes ($p > 0{,}05$). Promedio + desviación estándar (n=3)*

El tiempo de colonización completa no fue homogéneo en todos los tratamientos (p=0,0087). Además, se disminuyó en seis días en el tratamiento T3 (*29,3 $\pm$ 1,53 días*) con respecto al control Tc (*35,3 $\pm$ 1,53 días*), ubicándose en un grupo estadístico significativamente diferente según la prueba de rangos múltiples de Tukey (Figura 9 y Tabla 11). Esta eficiencia cinética se podría explicar a un posible resultado acoplamiento bioquímico estimulado por la savia residual del banano. Los tejidos vasculares del pseudotallo de banano contienen concentraciones sobresalientes de potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg), que actúan como cofactores inorgánicos esenciales en el metabolismo fúngico (Islam *et al*., 2023).

Tabla 11

Resultados del cultivo en bolsas de Hericium erinaceus en el tiempo

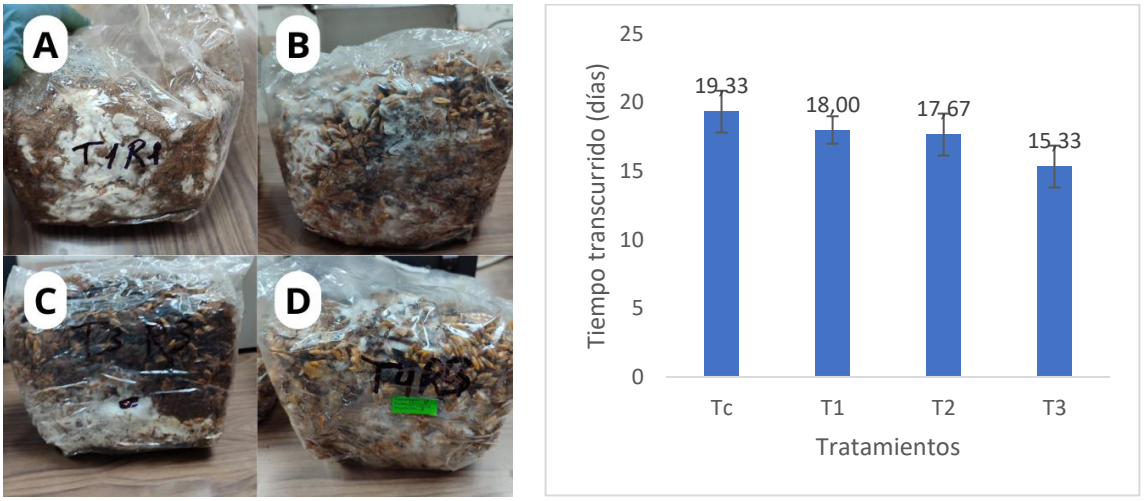
Tratamiento	***Tiempo de colonización (días)****	***Tiempo de aparición de primordio (días)****
Tc	$35{,}3 \pm 1{,}53^{B}$	$4{,}3 \pm 0{,}58^{A}$
T1	$34{,}0 \pm 2{,}00^{B}$	$3{,}7 \pm 0{,}58^{A}$
T2	$32{,}7 \pm 1{,}15^{AB}$	$4{,}3 \pm 0{,}58^{A}$
T3	$29{,}3 \pm 1{,}53^{A}$	$4{,}0 \pm 0{,}00^{A}$

Nota. Medias en columna con una letra similar no son significativamente diferentes ($p > 0{,}05$).

Promedio + desviación estándar (n=3).*

Figura 8

Resultados de la colonización micelial de Hericium erinaceus al 50%.



Nota. Las unidades de cultivo son los resultados de los tratamientos A. Tc (0%) B. T1 (10%) C.T2 (20%) y D. T3 (30%). Los valores del diagrama de barras representan la media de las réplicas $\pm$ la desviación estándar con n=3.

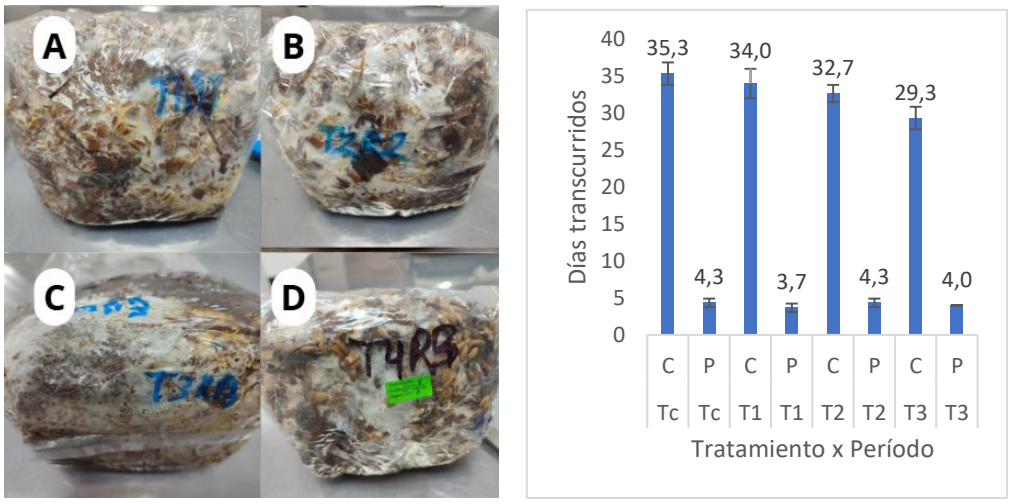
Diversas investigaciones moleculares han comprobado que la adición de cationes Ca^{2+} y K^{+} en concentraciones de 5 a 10 mM incrementa significativamente la actividad catalítica de las lacasas extracelulares (como HeLac4c, una oxidasa de cobre clave aislada de *Hericium erinaceus*) (Kang et al., 2024). En este contexto, las lacasas son las enzimas responsables de iniciar la despolimerización oxidativa de la fracción de lignina presente en el aserrín de madera dura de la mezcla, abriendo paso a la

acción posterior de las celulasas y hemicelulasas (Atila, 2019). De este modo, la adición del residuo de banano no solo podría estar funcionando como un sustrato de degradación rápida, sino que estaría optimizando metabólicamente la asimilación de la fracción leñosa remanente del sustrato.

Posteriormente, la etapa de aparición de primordios, inducida mediante la alteración de las variables controladas (reducción de temperatura a 18 °C, incremento de humedad relativa al 90% y fotoperiodo de 8 horas de luz diaria), se desarrolló de manera uniforme (Figura 10).

Figura 9

Resultados crecimiento micelial y desarrollo de primordios en unidades de cultivo

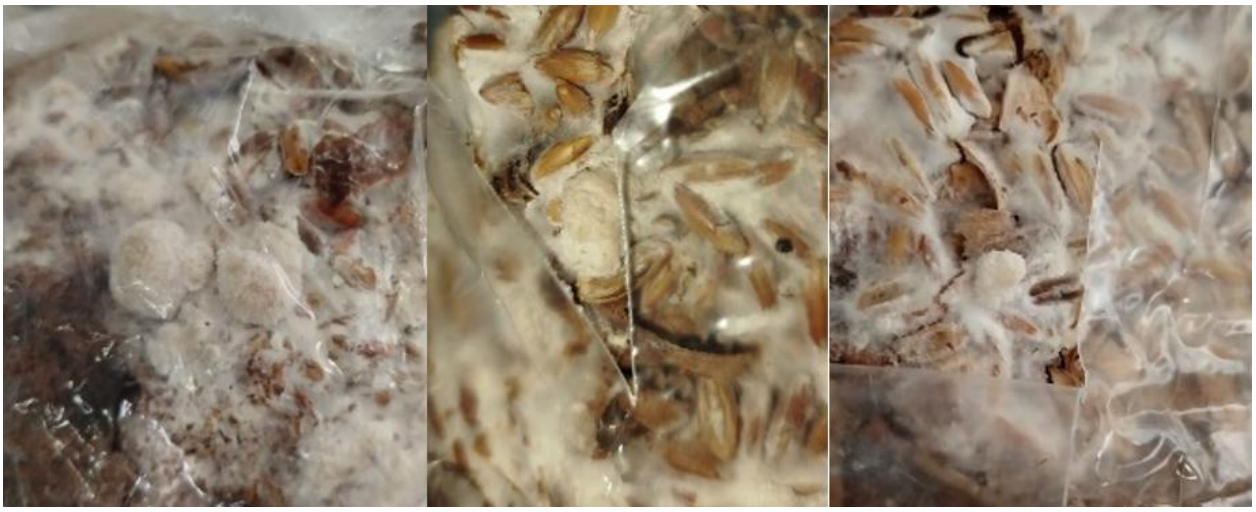


Nota. El panel muestra el estado de las bolsas de cultivo al alcanzar aproximadamente el 100% de la colonización del sustrato A. Tc (0%) B. T1 (10%) C.T2 (20%) y D. T3 (30%). Se muestran los resultados como la media de los resultados obtenidos (n=3). C (colonización), P (Formación de primordios).

La ausencia de diferencias estadísticas significativas (p=0,363) en el tiempo de formación de los primordios (oscilando estrechamente entre $3{,}7 \pm 0{,}58$ y $4{,}3 \pm 0{,}58$ días) (Figura 9) demuestra que las relaciones lignina/celulosa y los niveles de nitrógeno introducidos por la biomasa de banano no interfieren con las señales moleculares que coordinan la transición de la fase vegetativa a la reproductiva en la especie.

Figura 10

Formación de los primordios luego de la inducción a la fructificación por cambio de condiciones



Nota. En la imagen se puede observar la formación de primordios luego del cambio de condiciones ambientales a los que estaban sometidas las unidades de cultivo. Su desarrollo empieza con pequeños botones blanco amarillento para ir formando los cuerpos fructíferos de mayor tamaño.

Al comparar el tiempo necesario para la colonización del sustrato se puede observar que los rangos obtenidos coinciden con los reportados en la literatura. En el caso del tiempo necesario para la colonización completa del sustrato, Atila et al. (2021) obtuvieron resultados entre 23 y 32 días con una formulación a base de aserrín y salvado de trigo (proporción 8:2). Por su parte, Lu et al. (2024) reportaron que la etapa micelial duró un total de 30 días con una formulación optimizada de 59,7% zuro de maíz, 20% salvado de trigo, 16,3% paja de arroz, 2% de yeso, 1% de sacarosa y 1% de superfosfato de calcio. Esto indicaría que las formulaciones con suplementación de residuos de banano son comparables con formulaciones establecidas y optimizadas durante la etapa de colonización micelial.

Eficiencia Biológica

Los resultados obtenidos del rendimiento de los basidiomas y la determinación de la eficiencia biológica (EB) se usaron como el estándar para evaluar el potencial comercial y de transferencia tecnológica de sustratos orgánicos alternativos. Al cosechar los cuerpos fructíferos maduros de *H.*

erinaceus de las bolsas de cultivo (cada una con 200g de sustrato seco inicial), se evidenció una respuesta sin un patrón lineal ni homogeneidad ante la sustitución de aserrín de madera dura por residuos de banano (p=0,0291).

Tabla 12

Resultados de la cosecha del cultivo de Hericium erinaceus en bolsas

Tratamiento	***Biomasa cuerpos fructíferos (g)****	***Eficiencia biológica (%)****
Tc	$29{,}55 \pm 3{,}61^{ab}$	$14{,}77 \pm 1{,}80^{ab}$
T1	$25{,}23 \pm 3{,}05^{a}$	$12{,}62 \pm 1{,}52^{a}$
T2	$26{,}44 \pm 1{,}88^{ab}$	$13{,}22 \pm 0{,}94^{ab}$
T3	$33{,}78 \pm 2{,}90^{b}$	$16{,}89 \pm 1{,}45^{b}$

Nota. Medias en columna con una letra similar no son significativamente diferentes ($p > 0{,}05$). Promedio ± desviación estándar (n=3).

Se constató una disminución inicial de la biomasa fresca promedio en el tratamiento T1 (*25,23 ± 3,05 g*, EB: *12,62 ± 1,52%*) en comparación con el control Tc (*29,55 ± 3,61*, EB:*14,77 ± 1,80*) (Figura 11). Este fenómeno se le podría atribuir a las alteraciones físicas y mecánicas en el lecho del sustrato. Las fibras trituradas del pseudotallo de banano poseen una densidad aparente significativamente menor y una retención de agua por capilaridad superior a la del aserrín de madera dura compactado.

A concentraciones de reemplazo bajas (10%), se podría estar generando una ligera distorsión en la microporosidad del sustrato mixto, limitando parcialmente el intercambio de gases y la tasa de difusión de oxígeno hacia el interior del micelio reproductivo. No obstante, a este nivel de sustitución, el aporte de nutrientes adicionales de los residuos de banano no sería lo suficientemente alto como para compensar la restricción del desarrollo físico hifal, resultando en basidiomas de menor volumen y peso seco.

Por el contrario, al incrementar la tasa de sustitución al 30% en el tratamiento T3, se superó esta barrera física y estructural del sustrato, obteniéndose la mayor productividad biológica de todo el

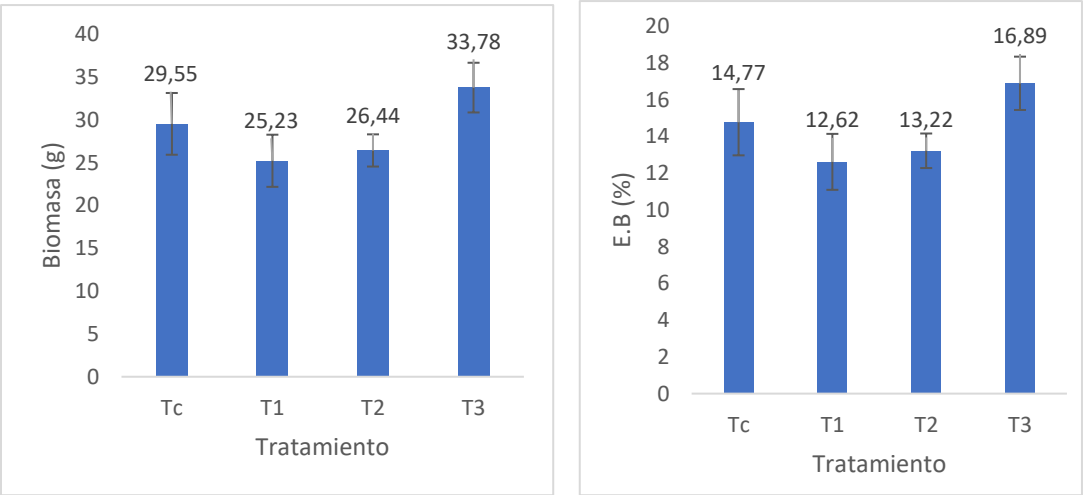
ensayo, con un promedio de biomasa de *33,78 ± 2,90* g y una eficiencia biológica del *16,89 ± 1,45*, como se observa en la Tabla 12. Este comportamiento diferencial estadísticamente significativo con respecto a T1 es probablemente debido a la gran disponibilidad y asimilación de nitrógeno orgánico aportado por el raquis de banano (0,64%) y el pseudotallo (0,28%), conjugado con un aporte de fósforo (P) y potasio (K) solubles que promueven la expansión de las células del basidioma durante la captación de agua. Adicionalmente, la relación de carbono a nitrógeno (C:N) en T3 se podría estar equilibrando de forma óptima hacia el rango ideal de 25:1 a 30:1, requerido por *Hericium erinaceus* para mitigar el crecimiento puramente vegetativo y canalizar los recursos carbonados hacia la síntesis de biomasa reproductiva pesada (Chutimanukul et al., 2023a).

Los resultados obtenidos muestran una mejora en la eficiencia biológica obtenida con respecto al tratamiento control convencional, esto difiere de los resultados obtenidos por Obodai *et al*. (2003), que al usar residuos de banano, se mostró una clara reducción de EB al trabajar con *Pleurotus ostreatus*, esto podría significar que *H. erinaceus* se ve beneficiado de mejor manera por la suplementación con esta materia prima.

Al comparar estos rendimientos con otras investigaciones basadas en la sustitución de madera dura por pajas agrícolas en el cultivo de *Hericium erinaceus*, como las mezclas optimizadas de paja de arroz y olote de maíz desarrolladas en China que alcanzan eficiencias biológicas de hasta el 89,14% mediante metodologías complejas de optimización por red simplex, se comprueba que la mezcla directa de residuos frescos de banano y aserrín presenta un amplio margen de mejora técnica mediante el ajuste del tamaño de partícula, la compactación y la suplementación nitrogenada dirigida (Lu *et al.*, 2024). No obstante, el rendimiento del tratamiento T3 demuestra que el aprovechamiento de la biomasa de banano como suplemento puede mejorar la producción local de melena de león en zonas de alta disponibilidad de este residuo.

Figura 11

Resultados obtenidos de la cosecha en biomasa y eficiencia biológica



Nota. Se muestran los resultados como la media de los resultados obtenidos (n=3).

Los posibles motivos por los que en esta investigación la eficiencia biológica arrojó valores por debajo de los reportados en la literatura pueden ser genéticos, ambientales o debido a una disminución del vigor de la cepa debido al almacenamiento. Un motivo común en el cultivo de hongos suele ser una relación carbono:nitrógeno (C:N) demasiado alta, lo que llega a suprimir la inducción del cuerpo fructífero mientras se estimula el crecimiento micelial, patrón observado en este estudio (Sakamoto, 2018). No obstante, debido a que el tratamiento control también obtuvo valores similares a los Tc, T2 y T3 está variable podría no ser la principal causa.

A nivel biológico se podría explicar este fenómeno a través una posible falta de moléculas inductoras específicas como ciertos cerebrósidos o saponinas, alteraciones en el metabolismo del triptófano y la señalización por AMPc, que genera un retraso o impide la formación de primordios (Sakamoto, 2018). Esta falta de inductores se produce si el descenso de temperatura no genera el estímulo crítico para iniciar la fructificación. En la metodología aplicada se usó una temperatura de colonización de 22 ℃ y 19 ℃ para la fructificación, dado que el gradiente de temperatura no es tan alto

como los reportados en literatura que pasan de 25 ℃ a 18 o 15℃ el choque térmico pudo no ser lo suficientemente fuerte para activar estas vías de señalización (Chutimanukul *et al.,* 2023b).

Un factor ambiental determinante fue el confinamiento del cultivo en una incubadora cerrada, aunque se procuró un intercambio gaseoso y renovación del aire este pudo ser insuficiente, favoreciendo la acumulación de CO_2 dentro de la cámara. Tal como señala Sakamoto (2018), esta acumulación de CO_2 suprime la diferenciación del píleo y favorece el crecimiento de otras estructuras, lo que disminuye la calidad y éxito de la fructificación.

Cabe mencionar que dentro de las limitaciones del estudio estuvo el uso de una cepa comercial no optimizada previamente. En este contexto, Silva et al. (2025) han reportado que puede haber ocurrido una degeneración de la cepa; este fenómeno se produce espontáneamente y afecta directamente en la capacidad del hongo de producir cuerpos fructíferos. Cuando estas cepas provienen de fuentes comerciales, el traslado repetido del micelio a nuevos medios de cultivo o su almacenamiento por largos períodos ocasiona la pérdida progresiva de la capacidad reproductiva sexual.

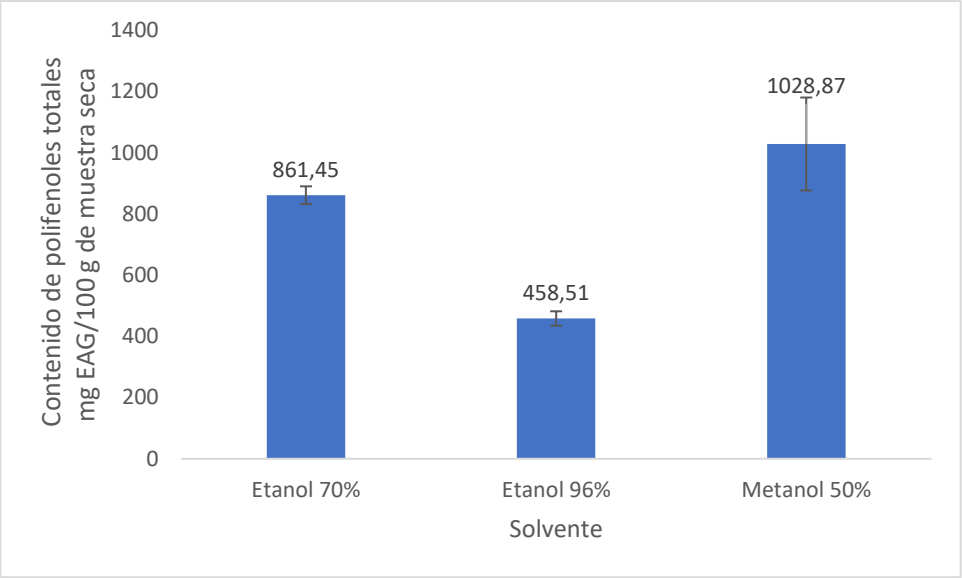
Antes de ser usada la cepa, la acumulación de especies reactivas de oxígeno y el estrés fisiológico debido al transporte y almacenamiento son factores que están vinculados con la degeneración de la cepa y la pérdida de productividad. A medida que la cepa envejece en un entorno artificial, puede perder la estabilidad necesaria para mantener sus características morfológicas y biosintéticas originales (Danner *et al.*, 2023).

Elección de solvente

La cuantificación precisa del contenido fenólico total (CFT) y el posterior análisis de la capacidad micoquímica antioxidante dependen críticamente del coeficiente de reparto y de la polaridad del solvente de extracción empleado. Para este propósito, se realizó un ensayo comparativo utilizando el micelio deshidratado de *Hericium erinaceus* sometido a tres sistemas de solventes polares de referencia (Figura 12).

Figura 12

Resultados obtenidos en el ensayo de cuantificación de fenoles totales con diferentes solventes



Nota. Se muestran los resultados como la media de los resultados obtenidos (n=3).

El análisis de varianza y la posterior prueba de Tukey determinaron diferencias significativas entre el sistema de etanol al 96% y los otros dos tratamientos ($p = 0{,}0006$). Sin embargo, el par metanol al 50% y etanol al 70% demostraron ser estadísticamente equivalentes en cuanto a su poder de recuperación de polifenoles fúngicos. Se seleccionó la mezcla de metanol al 50% como el solvente de trabajo para la caracterización posterior debido a que obtuvo la media numérica más alta (*1029* $\pm$ *152 mg EAG/100g PS*) (Tabla 13).

Fisiológicamente, la adición de una fracción de agua al alcohol orgánico incrementa la constante dieléctrica y promueve el hinchamiento de la matriz polimérica de la pared celular fúngica, facilitando la difusión y solvatación de compuestos fenólicos hidrofílicos (ácidos fenólicos libres) y compuestos de polaridad intermedia que de otro modo quedarían retenidos en la red estructural fúngica (Kala *et al.*, 2025).

Tabla 13

Resultados obtenidos en la prueba de fenoles totales con los solventes utilizados para la extracción de compuestos

Tratamiento	***mg EAG/100g seco****
Etanol 70%	861 ± 29^{A}
Etanol 96%	459 ± 23^{B}
Metanol 50%	$1029 \pm 15{,}2^{B}$

Nota. Medias con una letra similar no son significativamente diferentes ($p > 0{,}05$). Promedio ± desviación estándar (n=3).*

Concentración de fenoles totales

La cuantificación del contenido de fenoles totales en los basidiomas cosechados de cada tratamiento reveló un comportamiento metabólico parabólico de gran interés y significancia estadística ($p < 0{,}0001$) a través del cálculo de una curva de calibración con un comportamiento lineal (Figura 13).

Tabla 14

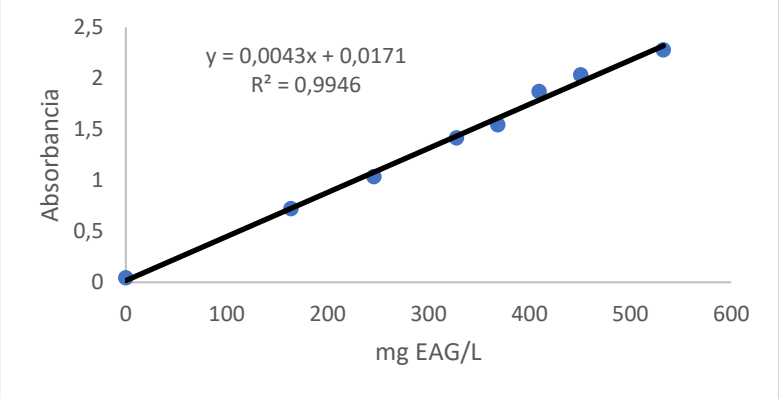
Concentración de compuestos fenólicos obtenidos en los tratamientos

Tratamiento	***mg EAG/100g seco****
Tc	1029 ± 152^{A}
T1	2100 ± 148^{B}
T2	3141 ± 243^{C}
T3	1028 ± 34^{A}

Nota. Medias con una letra similar no son significativamente diferentes ($p > 0{,}05$). Promedio ± desviación estándar (n=3).*

Figura 13

Curva de calibración obtenida para la estimación de fenoles totales

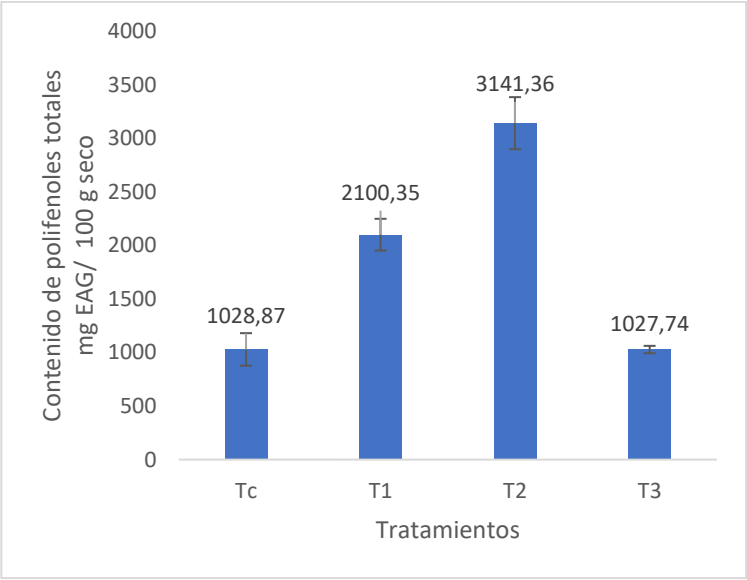


Se demostró un drástico incremento de más del 100% en el contenido fenólico del tratamiento T1 (*2100* $\pm$ *148* mg EAG/100g PS), alcanzando el máximo absoluto en el tratamiento T2 con un promedio de *3141* $\pm$ *243* mg EAG/ g PS (un aumento del 305% con respecto al control Tc). Al analizar el tratamiento T3, los valores de CFT colapsaron de forma abrupta (*1028* $\pm$ *34* mg EAG/100g PS), retornando a niveles idénticos a los del control Tc (

14 y Tabla 14).

Figura 14

Resultados de la cuantificación de fenoles totales obtenidos en los extractos de los tratamientos



Nota. Se muestran los resultados como la media de los resultados obtenidos (n=3).

Este comportamiento responde de manera directa al mecanismo bioquímico del desvío metabólico, el cual se encuentra estrechamente coordinado por el estrés nutricional y la relación de carbono a nitrógeno disponible en la matriz del sustrato (Pareek *et al*., 2021). En concentraciones moderadas de sustitución (T2), la presencia de compuestos fitoquímicos solubles y taninos provenientes de la corteza del pseudotallo de banano, junto con la disponibilidad de precursores inorgánicos, podría estar actuando como un inductor químico y un desencadenante de estrés adaptativo no letal para *Hericium erinaceus*. Para contrarrestar esta perturbación química del medio, el hongo probablemente

activa vías secundarias de defensa celular, derivando el carbono y los aminoácidos excedentes (particularmente la fenilalanina) hacia la síntesis de ácidos fenólicos antioxidantes y flavonoides mediante la inducción enzimática de enzimas clave como la fenilalanina amonio-liasa (Hyun *et al.,* 2011).

Por el contrario, en el tratamiento T3 (30% de sustitución), la alta carga de nitrógeno fácilmente asimilable provisto por el raquis y las hojas de banano desactiva las vías de señalización de estrés fúngico (Tudzynski, 2014). Al encontrarse en un medio sumamente rico en nutrientes minerales y nitrógeno soluble, el organismo podría estar redirigiendo su flujo metabólico de manera masiva hacia su metabolismo primario (Borkertas *et al*., 2025). El carbono celular se estaría canalizando de forma prioritaria hacia la mitosis, el alargamiento de hifas de la pared celular y la biosíntesis de polisacáridos estructurales como los glucanos de tipo xylano e inmunomoduladores neutros, deteniendo la costosa producción de metabolitos fenólicos secundarios, lo que justifica la caída abrupta del contenido total de fenoles observada en la formulación del tratamiento 3 (Tudzynski, 2014).

Actividad antioxidante de los extractos obtenidos

Los extractos de cada tratamiento micológico se sometieron a un ensayo de captación del radical libre DPPH, calibrado y estandarizado frente a una curva de referencia de Trolox, expresándose la actividad antioxidante final en micromoles equivalentes de Trolox por gramo de biomasa seca ($\mu mol\ ET\ /\ g\ seco$) (Figura 15).

En concordancia al comportamiento parabólico observado en el contenido total de fenoles de los diferentes tratamientos, el análisis estadístico de la capacidad de captación de radicales libres DPPH señaló diferencias estadísticamente significativas (p=0,0008) entre los grupos experimentales. A pesar de esto se observó una equivalencia estadística en el Tc, T1 y T2 en su poder reductor y entre el Tc con T3 (Tabla 15). La tendencia general fue superior en comparación con el T3, el cual obtuvo la media más baja con *19,50* $\pm$ *0,07* $\mu mol\ ET\ /\ g\ seco$ *(Figura 16)*.

Figura 15

Curva de calibración utilizada para la determinación de capacidad antioxidante

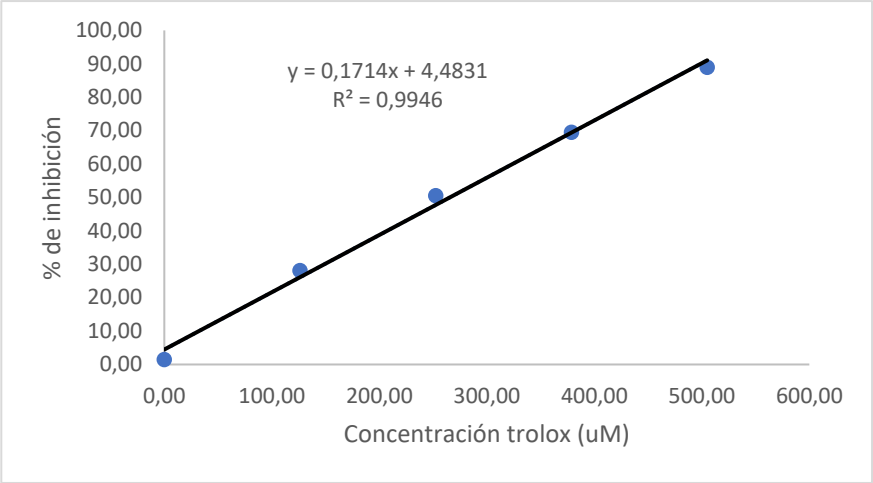


Tabla 15

Resultados del ensayo de capacidad antioxidante con DPPH.

Tratamiento	***Capacidad antioxidante µmol ET/g seco***
Tc	*21,45±0,51^{AB}*
T1	*22,91±1,15^{A}*
T2	*22,28± 1,22^{A}*
T3	*19,50±0,07^{B}*

Nota. Medias con una letra similar no son significativamente diferentes (p > 0,05). Promedio ± desviación estándar (n=3).

Este hallazgo pone de manifiesto la relación del contenido de fenoles y la capacidad antioxidante de los extractos obtenidos de los cuerpos fructíferos, evidenciada mediante el coeficiente de correlación de Pearson (*r* = 0,79, *p* = 0,0023); lo que indica que los resultados obtenidos en los ensayos de capacidad antioxidante se ven fuertemente explicados por los compuestos fenólicos presentes en el extracto.

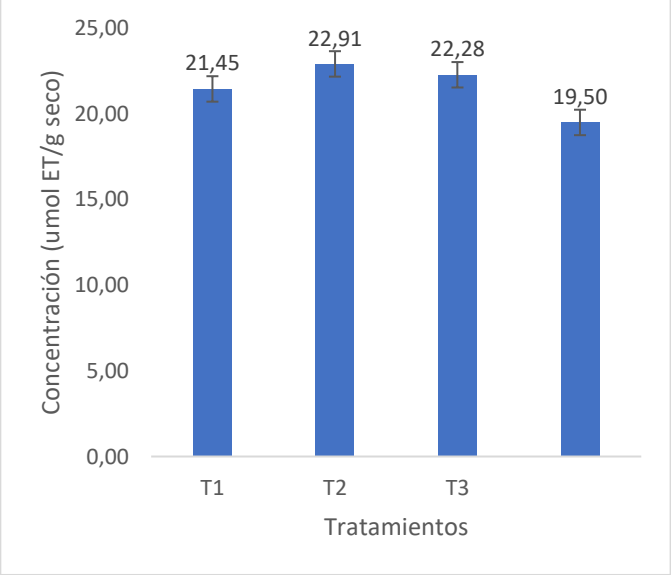
La disminución de las diferencias entre tratamientos puede deberse a que, como diversos estudios reportan, el ensayo espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu no reacciona de manera exclusiva con compuestos polifenólicos, sino que determina la capacidad reductora total del medio, viéndose

influenciado por otras moléculas reductoras insolubles en lípidos como el ácido ascórbico, péptidos reductores y azúcares (Lavega et al., 2023).

La actividad de captación del radical libre DPPH en extractos de *Hericium erinaceus* no es una consecuencia lineal única del contenido total de fenoles, sino del efecto cooperativo y de sinergia entre una variedad de componentes antioxidantes no fenólicos. En particular, los polisacáridos inmunomoduladores ramificados de la pared celular (glucoxilanos, heteroxiloglicanos y galactoxiloglicanos), el aminoácido ergothioneína, tocoferoles y vitaminas hidrosolubles presentes en la biomasa de melena de león poseen una gran capacidad de captación electrónica directa frente a especies reactivas de oxígeno (Yang et al., 2022).

Figura 16

Diagrama de barras de la concentración equivalente a trolox de cada tratamiento



Nota. Se muestran los resultados como la media de los resultados obtenidos (n=3).

En otros estudios se ha señalado correlaciones positivas entre el contenido total de fenoles y la capacidad antioxidante, (Atila *et al*., 2018) reportó una correlación muy fuerte de (r=0,936), mientras que otros estudios como el de (Narmuratova *et al*., 2025) señalan correlaciones positivas más débiles

(r=0,86), lo que se podría explicar por la diferencia entre protocolos, la polaridad del solvente utilizado y la diferencia presente entre el perfil químico recuperado en el extracto.

La disminución entre la diferencia del contenido de fenoles con el potencial antioxidante en el tratamiento T3, se podría deber a que aunque la biosíntesis de polifenoles libres se redujo drásticamente debido a la redirección de recursos moleculares hacia el metabolismo primario, la masiva acumulación de biomasa hifal estuvo acompañada de un incremento paralelo en la síntesis de polisacáridos y fitoquímicos no fenólicos estimulados por la abundante disponibilidad de glucosa y sacarosa de la savia del banano (Palacios, 2016; Tudzynski, 2014).

El posible aumento compensatorio de antioxidantes estructurales pudo ser la razón por la cual la capacidad de captación de radicales libres en el tratamiento 3 termino igualando el poder antioxidante del tratamiento Tc, a pesar de que este es comparable con los tratamientos 2 y 3 que fueron los que mayor potencial mostraron.

Capítulo V

Conclusiones

La incorporación parcial de residuos agroindustriales de banano en el sustrato favoreció el crecimiento vegetativo de *Hericium erinaceus*. Los mayores porcentajes de sustitución incrementaron la velocidad de crecimiento radial y una reducción del tiempo de colonización (3,04 ± 0,046 mm/día y 29,3 ± 1,53 días con 30% de reemplazo), lo que sugiere que estos residuos aportan nutrientes que favorecen el establecimiento del micelio.

La eficiencia biológica presentó respuesta no lineal frente a la adición de residuos, con el menor rendimiento al 10 % (12,62 ± 1,52 %) y el mayor al 30% de sustitución (16,89 ± 1,45%), lo que sugiere una mejor disponibilidad de nutrientes durante la fructificación a este nivel de sustitución.

La sustitución del sustrato modificó el contenido de compuestos fenólicos determinado mediante el ensayo Folin-Ciocalteu de forma positiva hasta un límite alrededor del 30% de sustitución; mientras que, la actividad antioxidante determinada mediante DPPH mostró una correlación positiva con el contenido fenólico (r = 0,79), lo que indica que la suplementación con residuos de banano influye en la composición fenólica y la capacidad antioxidante.

En conjunto, los residuos agroindustriales de banano constituyen una alternativa viable, como componente parcial del sustrato para el cultivo de *Hericium erinaceus*. Sin embargo, el porcentaje óptimo de sustitución que se desee utilizar dependerá del objetivo de producción, ya que los tratamientos con mayor crecimiento micelial no necesariamente presentaron el mejor rendimiento productivo. En este estudio, el 20 % de sustitución ofreció el mejor equilibrio entre crecimiento, rendimiento y capacidad antioxidante.

Recomendaciones

Previo a la realización de cualquier investigación que involucre el uso de residuos agroindustriales es importante establecer claramente que características de los mismos deben estandarizarse, como puede ser el tamaño de partícula, capacidad de retención de agua, relación carbono:nitrógeno, la humedad y el tratamiento previo para permitir una mejor biodisponibilidad de los nutrientes que contiene la biomasa.

Para investigaciones futuras se recomienda evaluar como cada tipo de residuo de banano (hojas, raquis, pseudotallo, etc.) genera un efecto individual en el crecimiento de *Hericium erinaceus* y otros hongos del mismo grupo capaces de producir cuerpos fructíferos comestibles como *Pleurotus ostreatus, Ganoderma lucidum*, entre otros.

Se recomienda evaluar con que residuos se pueden combinar los ya investigados en este estudio para mejorar la estructura del sustrato aumentando la porosidad y oxigenación, como el olote de maíz, viruta de madera dura o cascarilla de arroz y así lograr una mayor eficiencia biológica.

Se puede mejorar la comprensión de los mecanismos moleculares y químicos si se hace uso de herramientas que permitan establecer relaciones más sólidas del cambio de sustrato o medio con la transcriptómica o metabolómica con técnicas como qRT-PCR o HPLC respectivamente. Con esto se plantea ver si la vía de síntesis de compuestos tales como erinacinas, hericenonas y ergotioneína se está viendo afectada basado en si las enzimas o compuestos intermediarios aumentan o disminuyen.

Referencias:

Alsoufi, M. H., AlGhamdi, N., AlAhmady, N. F., Aldakheel, L. A., Aldakheel, F. A., Almousa, S., y AlAbdalall, A. (2025). Morphology, anticancer and neurological activities of Hericium erinaceus. *Brazilian Journal of Biology*, *85*, e296172. https://doi.org/10.1590/1519-6984.296172

Assan, N., y Mpofu, T. (2014). *The influence of substrate on mushroom productivity*. *3*(7), 86-91. https://doi.org/10.14196/sjcs.v3i7.1502

Atila, F. (2019). *Lignocellulosic and proximate based compositional changes in substrates during cultivation of Hericium erinaceus mushroom*. *258*, 108779. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108779

Atila, F., Tuzel, Y., Fernández, J. A., Cano, A. F., y Sen, F. (2018). The effect of some agro– industrial wastes on yield, nutritional characteristics and antioxidant activities of Hericium erinaceus isolates. *Scientia Horticulturae*, *238*, 246-254. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.049

Atila, F., Tüzel, Y., Pekşen, A., Cano, A. F., y Fernández, J. A. (2021). The effect of different fruiting temperatures on the yield and nutritional parameters of some wild and hybrid Hericium isolates. *Scientia Horticulturae*, *280*, 109915. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109915

Ayala, D. (2024). *Uso de residuos orgánicos de cebada, arveja y eucalipto como sustrato para la producción de hongo ostra rosado (Pleurotus djamor)*. Universidad Técnica del Norte.

Baek, J., y Lee, M.-G. (2016). Oxidative stress and antioxidant strategies in dermatology. *Redox Report*, *21*(4), 164-169. https://doi.org/10.1179/1351000215Y.0000000015

Boa, E. (2005). *Los hongos silvestres comestibles. Perspectiva global de su uso e importancia para la poblaci6n* (Vol. 17). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. https://www.fao.org/4/y5489s/y5489s00.pdf

Boddy, L., Crockatt, M., y Ainsworth, M. (2011). *Ecology of Hericium cirrhatum, H. coralloides and H. erinaceus in the UK*. *4*(2), 163-173.

Borkertas, S., Viskelis, J., Viskelis, P., Streimikyte, P., Gasiunaite, U., y Urbonaviciene, D. (2025). Fungal Biomass Fermentation: Valorizing the Food Industry's Waste. *Fermentation*, *11*(6), 351. https://doi.org/10.3390/fermentation11060351

Chong, P. S., Fung, M.-L., Wong, K., y Lim, L. W. (2019). *Therapeutic Potential of Hericium erinaceus for Depressive Disorder*. *21*(1), 63. https://doi.org/10.3390/ijms21010163

Chutimanukul, P., Phatthanamas, W., Thepsilvisut, O., Chantarachot, T., Thongtip, A., y Chutimanuku, P. (2023). *Commercial scale production of Yamabushitake mushroom (Hericium erinaceus (Bull.) Pers. 1797) using rubber and bamboo sawdust substrates in tropical regions*. *13*(1), 13316.

Chutimanukul, P., Sukdee, S., Prajuabjinda, O., Thepsilvisut, O., Panthong, S., Athinuwat, D., Chuaboon, W., Poomipan, P., y Vachirayagorn, V. (2023). The Effects of Soybean Meal on Growth, Bioactive Compounds, and Antioxidant Activity of Hericium erinaceus. *Horticulturae*, *9*(6), 693. https://doi.org/10.3390/horticulturae9060693

Collazos, S., y Pinzón, A. (2022). *Propuesta de aprovechamiento del pseudotallo o vástago de plátano para fabricar fibras textiles en Colombia* [Fundación Universidad de América]. https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/63f87032-8034-4dbe-8c9a-2c2afe53330a/content

Contato, A., y Conte-Junior, C. (2025). *Lion's Mane Mushroom (Hericium erinaceus): A Neuroprotective Fungus with Antioxidant, Anti-Inflammatory, and Antimicrobial Potential-A Narrative Review.* *17*(8), 1307. https://doi.org/10.3390/nu17081307

Corporación Financiera Nacional B.P. (2024). *Ficha Sectorial: Banano.* [Ficha Sectorial]. https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/2024/10/Ficha-Sectorial-Banano.pdf

Danner, C., Mach, R. L., y Mach-Aigner, A. R. (2023). The phenomenon of strain degeneration in biotechnologically relevant fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *107*(15), 4745-4758. https://doi.org/10.1007/s00253-023-12615-z

Dhiman, S., Kaur, P., Narang, J., Mukherjee, G., Thakur, B., Kaur, S., y Tripathi, M. (2024). Fungal bioprocessing for circular bioeconomy: Exploring lignocellulosic waste valorization. *Mycology*, *15*(4), 538-563. https://doi.org/10.1080/21501203.2024.2316824

Doar, E., Meyer, K., Bair, Z., Nally, R., McNalley, S., Davis, R., y Beathard, C. (2025). *Influences of substrate and tissue type on erinacine production and biosynthetic gene expression in Hericium erinaceus*. *12*(1), 4. https://doi.org/10.1186s40694-025-00194-9

Elbehri, A., Calberto, G., Staver, C., Hospido, A., y Skully, D. (2015). *Cambio climático y sostenibilidad del banano en el Ecuador: Evaluación de impacto y directrices de política*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a0ecba08-d28b-4bf9-a704-b2be5f9f697f/content

Gariboldi, M. B., Marras, E., Ferrario, N., Vivona, V., Prini, P., Vignati, F., y Perletti, G. (2023). Anti-Cancer Potential of Edible/Medicinal Mushrooms in Breast Cancer. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*(12), 10120. https://doi.org/10.3390/ijms241210120

Geisendorf, S., y Pietrulla, F. (2017). *The circular economy and circular economic concepts—A literature analysis and redefinition*. *60:771–782*. https://doi.org/10.1002/tie.21924

Georgé, S., Brat, P., Alter, P., y Amiot, M. J. (2005). Rapid Determination of Polyphenols and Vitamin C in Plant-Derived Products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *53*(5), 1370-1373. https://doi.org/10.1021/jf048396b

Gu, J.-D. (2020). *On Environmental Biotechnology of Bioremediation*. *5*(2), 28-33. https://doi.org/10.26789/AEB.2020.02.002

Gulcin, İ. (2020). Antioxidants and antioxidant methods: An updated overview. *Archives of Toxicology*, *94*(3), 651-715. https://doi.org/10.1007/s00204-020-02689-3

Haq, I., Khan, M., Khan, S., y Ahmad, M. (2011). *Biochemical analysis of fruiting bodies of Volvariella volvacea strain Vv pk, grown on six different substrates*. *30*(2), 146-150.

Herrera, A., y Cárdenas, D. (2019). *Evaluación de rastrojo de maíz como sustrato para la producción de 20 cepas de hongos comestibles* [Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/3479790a-3401-4007-a5bd-7d06ea6c6e9d/content

Hyun, M. W., Yun, Y. H., Kim, J. Y., y Kim, S. H. (2011). Fungal and Plant Phenylalanine Ammonia-lyase. *Mycobiology*, *39*(4), 257-265. https://doi.org/10.5941/MYCO.2011.39.4.257

Islam, M. S., Kasim, S., Amin, A. M., Alam, Md. K., Khatun, Mst. F., Ahmed, S., Gaber, A., y Hossain, A. (2023). Foliar application of enriched banana pseudostem sap influences the nutrient uptake, yield, and quality of sweet corn grown in an acidic soil. *PLOS ONE*, *18*(8), e0285954. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285954

Jiménez, C. (2017). *Evaluación de polímeros en pseudotallos de Musa acuminata AAA, Musa sapientum ABB y Musa paradisiaca AAB para elaboración de bioplástico* [Tesis, El Colegio de la Frontera Sur]. https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1586/1/100000058414_documento.pdf

Kala, K., Cicha-Jele ´, M., Sułkowska-Ziaja, K., Ostachowicz, B., Wegrzynowicz, E., Lazur, J., Szewczyk, A., y Muszy ´nska, B. (2025). *Influence of Plant-Based Substrate Composition and Extraction Method on Accumulation of Bioactive Compounds in Hericium erinaceus (Bull.) Pers. Fruiting Bodie*. *30*, 3094. https://doi.org/10.3390/molecules30153094

Kang, J., La, T. V., Kim, M.-J., Bae, J.-H., Sung, B. H., Kim, S., y Sohn, J.-H. (2024). Secretory Production of the *Hericium erinaceus* Laccase from *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, *34*(4), 930-939. https://doi.org/10.4014/jmb.2312.12043

Kostanda, E., Musa, S., y Pereman, I. (2024). Unveiling the Chemical Composition and Biofunctionality of Hericium spp. Fungi: A Comprehensive Overview. *International Journal of Molecular Sciences*, *25*(11), 5949. https://doi.org/10.3390/ijms25115949

Lavega, R., Grifoll, V., Siles, M. D. L. N., Bravo, P., Santoyo, S., y Pérez-Clavijo, M. (2023). *Comparative Evaluation of Antioxidant Activities in Mycelia, Fruiting Bodies and Spent Mushroom Substrate of Edible Mushrooms*. In Review. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2946203/v1

Li, H., Park, S., Moon, B., Yoo, Y.-B., Lee, Y.-W., y Lee, C. (2012). Targeted phenolic analysis in Hericium erinaceum and its antioxidant activities. *Food Science and Biotechnology*, *21*(3), 881-888. https://doi.org/10.1007/s10068-012-0114-1

Li, J., Mo, J., Hu, S., Dong, X., Li, J., Yang, L., y Wu, Y. (2024). Effects of Hericium erinaceus polysaccharide in porcine IPEC-J2 intestinal epithelial cells against apoptosis induced by oxidative stress. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology y Pharmacology*, *280*, 109902. https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2024.109902

Lisiecka, J., Prasad, R., y Jasinska, A. (2021). *The Utilisation of Pholiota nameko, Hypsizygus marmoreus, and Hericium erinaceus Spent Mushroom Substrates in Pleurotus ostreatus Cultivation*. *7*(10), 396. https://doi.org/10.3390/horticulturae7100396

Liu, H., Zhao, C., Pang, S., Shu, Y., Chen, L., Wang, J., y Bai, H. (2026). Ultrasound-Assisted Extraction of Polyphenols from Hericium erinaceus: Optimization, Bioactivities and LC-MS-Based Chemical Profiling. *Molecules*, *31*(7), 1138. https://doi.org/10.3390/molecules31071138

Lu, Z., Liu, L., Ren, Z., Hu, S., Wang, Y., Ji, S., Xu, W., Du, Z., Lu, Y., Yang, Y., y Yu, Y. (2024). *Optimization of substrate formulation for Hericium erinaceus by replacing wood by straw and their effect on enzyme activities*. *15:1436385*. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1436385

Marcillo-Parra, V., Anaguano, M., Molina, M., Tupuna-Yerovi, D. S., y Ruales, J. (2021). Characterization and quantification of bioactive compounds and antioxidant activity in three different varieties of

mango (Mangifera indica L.) peel from the Ecuadorian region using HPLC-UV/VIS and UPLC-PDA. *NFS Journal*, *23*, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.nfs.2021.02.001

Menon, A., Jalal, A., Arshad, Z., Nawaz, F., y Kashyap, R. (2025). *Benefits, side effects, and uses of Hericium erinaceus as a supplement: A systematic review*. *12*, 1641246. https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1641246

Ministerio de Comercio Exterior. (2017). *Informe sector bananero ecuatoriano.* https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2019/06/Informe-sector-bananero-espa%C3%B1ol-04dic17.pdf

Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad, y Instituto Nacional de Preinversión. (2014). *Atlas Bioenergético de la República del Ecuador (1.ª ed.)*. ESIN Consultora S.A. https://www.ambienteyenergia.gob.ec

Morales, Y., Cuautle, K., Diaz, M., y Maldonado, J. (2024). Usos de la hoja de plátano (Musa paradisiaca L.) en la gastronomía. *Revista de Gastronomía y Cocina*, *3*(1), 312. https://doi.org/10.5281/zenodo.10619494

Munteanu, I. G., y Apetrei, C. (2021). Analytical Methods Used in Determining Antioxidant Activity: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(7), 3380. https://doi.org/10.3390/ijms22073380

Narmuratova, Z., Mustafin, K., Zhakipbekova, A., Akhmetsadykov, N., Berillo, D., Bisko, N., Islam, S., y Suleimenova, Z. (2025). Polyphenols of Hericium erinaceus and Inonotus obliquus Mushrooms and their Antioxidant Potential. *ES Food y Agroforestry*. https://doi.org/10.30919/faf1914

Obodai, M., Cleland-Okine, J., y Vowotor, K. A. (2003). *Comparative study on the growth and yield of Pleurotus ostreatus mushroom on different lignocellulosic by-products*. (30), 146-149. https://doi.org/10.1007/s10295-002-0021-1

Palacios, M. (2016). *Caracterización química de la biomasa procedente de las hojas, pseudotallo, raquis y pseudopeciolo de la planta de banano y su relación con el poder calorífico* [Tesis, Universidad de Cuenca]. https://dspace-test.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/26232/1/TESIS.pdf

Paredes, D., y Álvarez, M. (2010). *Obtención de Enzimas Celulasas por Fermentación Sólida de Hongos para ser Utilizadas en el Proceso de Obtención de Bioalcohol de Residuos del Cultivo de Banano*. Revista Tecnológica ESPOL.

Pareek, V., Sha, Z., He, J., Wingreen, N. S., y Benkovic, S. J. (2021). Metabolic channeling: Predictions, deductions, and evidence. *Molecular Cell*, *81*(18), 3775-3785. https://doi.org/10.1016/j.molcel.2021.08.030

Prior, R. L., Wu, X., y Schaich, K. (2005). Standardized Methods for the Determination of Antioxidant Capacity and Phenolics in Foods and Dietary Supplements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *53*(10), 4290-4302. https://doi.org/10.1021/jf0502698

Rauf, A., Joshi, P. B., Ahmad, Z., Hemeg, H. A., Olatunde, A., Naz, S., Hafeez, N., y Simal-Gandara, J. (2023). Edible mushrooms as potential functional foods in amelioration of hypertension. *Phytotherapy Research*, *37*(6), 2644-2660. https://doi.org/10.1002/ptr.7865

Romero, E., Zuñiga, X., Romero, B., Tapia, D., y Carrasquero, E. (2024). La Eco Sustentabilidad: Una nueva forma Productiva con el aprovechamiento de las Fibras del Pseudotallo de Banano. *Estudios y Perspectivas Revista Científica y Académica*, *4*(4), 2756. https://doi.org/10.61384/r.c.a..v4i4.871

Sakamoto, Y. (2018). Influences of environmental factors on fruiting body induction, development and maturation in mushroom-forming fungi. *Fungal Biology Reviews*, *32*(4), 236-248. https://doi.org/10.1016/j.fbr.2018.02.003

Segarra, M. (2022). *Catálogo de uso de los residuos de la planta de banano, economía circular y su potencial en el cambio de la industria bananera en el Ecuador* [Tesis, Universidad Tecnológica

Indoamérica]. https://repositorio.uti.edu.ec/server/api/core/bitstreams/13ab6973-96b2-446f-b6ae-ddda369c7815/content

Sevindik, M., Gürgen, A., Khassanov, V. T., y Bal, C. (2024). Biological Activities of Ethanol Extracts of Hericium erinaceus Obtained as a Result of Optimization Analysis. *Foods*, *13*(10), 1560. https://doi.org/10.3390/foods13101560

Silva, M., Vida, M., Ramos, A. C., Lidon, F. J., Reboredo, F. H., y Gonçalves, E. M. (2025). Storage Temperature Effect on Quality and Shelf-Life of Hericium erinaceus Mushroom. *Horticulturae*, *11*(2), 158. https://doi.org/10.3390/horticulturae11020158

Suwannarach, N., Kumla, J., Zhao, Y., y Kakumyan, P. (2022). *Impact of Cultivation Substrate and Microbial Community on Improving Mushroom Productivity: A Review*. *11*, 569. https://doi.org/10.3390/biology11040569

Szućko-Kociuba, I., Trzeciak-Ryczek, A., Kupnicka, P., y Chlubek, D. (2023). Neurotrophic and Neuroprotective Effects of Hericium erinaceus. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*(21), 15960. https://doi.org/10.3390/ijms242115960

Tudzynski, B. (2014). Nitrogen regulation of fungal secondary metabolism in fungi. *Frontiers in Microbiology*, *5*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00656

Vera, J., Torres, S., Macías, H., Galarza, J., Piña, L., Morán, W., Rivera, L., y Cabrera, Ó. (2021). Valoración nutricional de los residuos orgánicos de banano en el cantón La Troncal, Ecuador. *Revista Universitaria del Caribe*, *26*(01), 78-86. https://doi.org/10.5377/ruc.v26i01.11882

Webster, K. (2021). *A Circular Economy Is About the Economy*. *1*(1), 115-126. https://doi.org/10.1007/s43615-021-00034-z

Yang, Y., Li, J., Hong, Q., Zhang, X., Liu, Z., y Zhang, T. (2022). Polysaccharides from Hericium erinaceus Fruiting Bodies: Structural Characterization, Immunomodulatory Activity and Mechanism. *Nutrients*, *14*(18), 3721. https://doi.org/10.3390/nu14183721

Yasin, M., Gangan, S., y Panchal, S. (2025). Banana peels: A Genuine waste or a wonderful opportunity? *Applied Sciences*, *15*(6), 3195. https://doi.org/10.3390/app15063195