APROXIMACIÓN BIOTECNOLÓGICA AL POTENCIAL DEGRADATIVO DE *Trichoderma harzianum* EN RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA INDUSTRIA FRUTÍCOLA PARA LA PRODUCCIÓN DE COMPOST ORGÁNICO.

RAFAEL ANTONIO BANDA DUARTE

MARLON LÓPEZ MENDEZ

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR-SECCIONAL AGUACHICA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGROINDUSTRIALES

INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

Aguachica, Cesar

2026

APROXIMACIÓN BIOTECNOLÓGICA AL POTENCIAL DEGRADATIVO DE *Trichoderma harzianum* EN RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA INDUSTRIA FRUTÍCOLA PARA LA PRODUCCIÓN DE COMPOST ORGÁNICO.

RAFAEL ANTONIO BANDA DUARTE

MARLON LÓPEZ MENDEZ

DIRECTOR(A)

MAG. YINA PAOLA ORTEGA SANTIAGO

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero agroindustrial
Línea de investigación

Tecnologías limpias: Sistemas de producción limpia y desarrollo sostenible

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR–SECCIONAL AGUACHICA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGROINDUSTRIALES

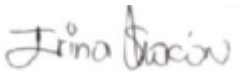
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

Aguachica, Cesar

2026

NOTA DE APROBACIÓN

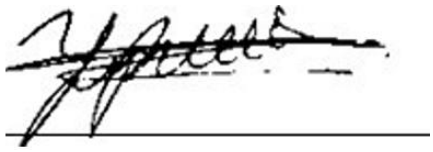
El trabajo de grado de **Rafael Antonion Banda Duarte**, titulado **"APROXIMACIÓN BIOTECNOLÓGICA AL POTENCIAL DEGRADATIVO DE *Trichoderma harzianum* EN RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA INDUSTRIA FRUTÍCOLA PARA LA PRODUCCIÓN DE COMPOST ORGÁNICO"**, ha sido aprobado por los jurados, quien no se hace responsable de su contenido, pero lo ha encontrado correcto en su calidad y en su forma de presentación por lo que en fe de lo cual firman.



Irina Suarez Chacón
EVALUADOR 1



Fabian Barbosa Páez
EVALUADOR 2



Yina Paola Ortega Santiago
DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

Dedico este logro a mis abuelos, por su amor y enseñanzas; a mis compañeros de estudio, por compartir conmigo este camino de aprendizaje; a mi prima y su esposo, por su apoyo y cariño; y, de manera muy especial, a "Xodo", por ser una persona importante en mi vida y una motivación para seguir adelante y luchar por mis sueños.

A todos ustedes, gracias por formar parte de este logro tan importante en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, a mi familia y a mis abuelos por su apoyo y motivación por su apoyo constante y por brindarme todo lo que estuvo a su alcance para ayudarme a alcanzar este logro. Gracias a ustedes, hoy soy la persona que soy. A la directora, Mag. Yina Paola Ortega Santiago, por su orientación, y a mi grupo de trabajo por el compromiso y la dedicación durante este proceso. Finalmente, agradecemos a la Universidad Popular del Cesar, Seccional Aguachica, por contribuir a nuestra

TABLA DE CONTENIDO

Glosario……9

Resumen …… 12

Abstract ……13

1. INTRODUCCIÓN 14

1.1 OBJETIVOS 17

1.1.1 Objetivo general 17

1.1.2 Objetivos específicos 17

1.2 MARCO TEÓRICO 18

1.2.1Composición de residuos de frutas 18

1.2.2 Residuos agroindustriales frutícolas 18

1.2.3 Composición de materiales lignocelulósicos 19

1.2.4 Microorganismo degradadores *Trichoderma harzianum* 20

1.2.5 Factores que afectan el potencial degradativo del *Trichoderma harzianum* en residuos frutícolas 20

1.2.6 Mecanismos Enzimáticos de *Trichoderma harzianum* en la degradación de residuos frutícolas 21

1.2.7 Fitotoxicidad de los lixiviados cítricos 22

1.3 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN (ESTADO DEL ARTE) 24

2 DISEÑO METODOLÓGICO 26

2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN 27

2.1.1 Enfoque de la investigación 27

2.1.2 Alcance de la investigación 29

2.1.3 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN 29
2.2 POBLACIÓN Y MUESTRA 31
2.2.1 Población 31
2.2.2 Muestra 32
2.3 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS 33
2.4 ANÁLISIS Y TABULACIÓN DE DATOS 34
2.5 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS 34
2.6 HIPÓTESIS Y VARIABLES 37
~~3~~ DESARROLLO DEL TEMA 40
3.1 Análisis bibliométrico con la herramienta VOSviewer 41
3.2 Análisis bibliométrico en Scopus 44
3.3 RESULTADOS 48
3.3.1 Objetivo 1: Clasificar los principales residuos de la industria frutícolas en función de su composición fisicoquímica, potencial de degradación y volumen de generación en procesos de compostaje orgánico. 48
3.3.2 Objetivo 2: Identificar los factores metabólicos que inciden en la degradación de los residuos de frutas efectuado por *Trichoderma harzianum*, incluyendo el papel de sus enzimas y condiciones óptimas de degradación. 41
3.3.3 Objetivo 3: Analizar la eficiencia degradativa de *Trichoderma harzianum*, según estudios reportados frente a otros microorganismos nativos de montaña en la biotransformación de residuos de frutas de la industria frutícola. 49
4. CONCLUSIONES 53
5. BIBLIOGRAFIA 56

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Descripcion general del proceso metodologico 27

Ilustración 2 Mapa de red coutoria de autores con superposición temporal (2016 - 2024) 41

Ilustración 3 Mapa de coocurrencia de términos (visualización de red bibliométrica de palabras clave)..... 42

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1 Número de documentos por año según Scopus (1976-2026) 35

Grafica 2 Número de documentos por autor según Scopus (1976-2026) 36

Grafica 3 Número de documentos por tipo según Scopus (1976-2026) 38

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 variables e indicadores relacionados al potencial degradativo del *Trichoderma harzianum* en residuos frutícolas. 20

Tabla 2 Composición Fisicoquímica de los Residuos de la Industria Frutícolas 30

Tabla 3 Factores que Inciden en la Degradación de los Residuos Frutícola 42

Tabla 4 Condiciones Metabólicas Óptimas para la Degradación de los Residuos Frutícola 45

Tabla 5 Enzimas que Intervienen en la Degradación de Residuos Frutícola 47

Tabla 6 Matriz analítica documental para el Objetivo 3 50

GLOSARIO

Biodegradación: Es el proceso mediante el cual los microorganismos transforman los materiales orgánicos por medio de su actividad metabólica y enzimática. En el aprovechamiento de residuos frutícolas, este proceso permite descomponer parte de los componentes vegetales y facilitar su transformación en materiales que pueden aprovecharse en procesos de compostaje (Houfani et al., 2020).

Biomasa lignocelulósica: Es el material de origen vegetal compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos componentes forman parte de la estructura de las plantas y su proporción puede variar según la especie y el tipo de residuo, influyendo en la facilidad con la que los microorganismos pueden descomponerlo (Houfani et al., 2020).

Celulosa: Es un polisacárido estructural que se encuentra en las paredes celulares de las plantas y constituye una parte importante de los residuos vegetales. Su descomposición puede realizarse mediante enzimas llamadas celulasas, que rompen su estructura y contribuyen al aprovechamiento biológico de materiales como las cáscaras y otros subproductos vegetales (Houfani et al., 2020).

Compost orgánico: Es un material obtenido mediante la transformación biológica de residuos orgánicos bajo condiciones adecuadas. Su producción permite aprovechar materiales que, de otro modo, podrían convertirse en desechos, y puede contribuir al mejoramiento de las propiedades del suelo cuando el compost alcanza una calidad y madurez apropiadas.

Compostaje: Es un proceso biológico controlado en el que los microorganismos descomponen y transforman residuos orgánicos. Su desarrollo depende de factores como la

humedad, la temperatura, la disponibilidad de oxígeno y las características del material utilizado. En esta investigación, se considera una alternativa para aprovechar residuos de la industria frutícola.

Hemicelulosa: Es un conjunto de polisacáridos presentes en las paredes celulares vegetales que, junto con la celulosa y la lignina, forma parte de la estructura de la biomasa. Algunos de sus componentes, como el xilano, pueden ser descompuestos por enzimas denominadas xilanasas, facilitando la transformación de los residuos vegetales (Dhaver et al., 2022).

Lacasas: Son enzimas oxidativas capaces de transformar determinados compuestos fenólicos y sustancias relacionadas con la lignina. Su actividad puede contribuir a la transformación de componentes complejos de los materiales vegetales; sin embargo, su participación depende de las características del sustrato y de las condiciones del proceso.

Lignina: Es un componente estructural de las paredes celulares vegetales que proporciona rigidez y resistencia a los tejidos. Debido a su estructura compleja, puede dificultar la degradación de los residuos vegetales y limitar el acceso de las enzimas a otros componentes, como la celulosa y la hemicelulosa (Houfani et al., 2020).

Residuos agroindustriales frutícolas: Son los materiales que se generan durante las actividades de procesamiento y transformación de frutas, entre ellos las cáscaras, las semillas, el bagazo y los restos de pulpa. Estos residuos contienen componentes orgánicos que pueden aprovecharse mediante procesos biológicos, dependiendo de su composición y de las condiciones de degradación.

Sustrato: Es el material sobre el cual actúa un microorganismo y del que puede obtener

nutrientes para su crecimiento y desarrollo. En esta investigación, los residuos de la industria frutícola representan los sustratos potenciales sobre los que puede *actuar Trichoderma harzianum,* según su composición y las condiciones del proceso (Dhaver et al., 2022).

Temperatura: Es un factor ambiental que influye en el crecimiento de los microorganismos y en la producción y actividad de sus enzimas. Las temperaturas favorables dependen de la especie, la cepa y las condiciones de estudio; por ello, es importante considerar este factor al evaluar el potencial degradativo de *Trichoderma harzianum* (Dhaver et al., 2022).

Trichoderma harzianum: Es un hongo filamentoso de interés biotecnológico por su capacidad para producir enzimas que participan en la transformación de materiales orgánicos. En esta monografía se estudia su potencial para actuar sobre residuos vegetales, teniendo en cuenta la composición del sustrato y factores ambientales que pueden influir en su actividad degradativa (Dhaver et al., 2022).

Xilanasas: Son enzimas que actúan sobre el xilano, un polisacárido que forma parte de la hemicelulosa presente en los materiales vegetales. Su función consiste en romper determinados enlaces de este componente, contribuyendo a la transformación de la biomasa. La producción de xilanasas por *Trichoderma harzianum* constituye uno de los aspectos de interés para el aprovechamiento de residuos agroindustriales (Dhaver et al., 2022).

RESUMEN

La generación de residuos provenientes de la industria frutícola representa un problema ambiental debido a la acumulación de materiales orgánicos y lignocelulósicos que pueden presentar dificultades para su aprovechamiento. En este contexto, el uso de microorganismos con capacidad degradativa constituye una alternativa biotecnológica para favorecer la transformación de estos residuos y su posterior aprovechamiento en procesos de compostaje. El objetivo de este estudio fue analizar el potencial degradativo de *Trichoderma harzianum* sobre residuos orgánicos de la industria frutícola, considerando su composición, los factores que condicionan su actividad y los mecanismos enzimáticos involucrados. Se desarrolló una investigación documental con enfoque cualitativo y apoyo de análisis estadístico descriptivo de datos secundarios. La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos como Scopus, ScienceDirect, SciELO, Google Scholar y otras fuentes académicas, mediante criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos. De un conjunto inicial de 675 documentos identificados, se seleccionaron 59 documentos pertinentes para el análisis. Los resultados evidenciaron diferencias importantes en la composición de los residuos, destacándose la cáscara de maracuyá por su contenido de celulosa (75,10 %), la cáscara de mandarina (67,77 %) y la cáscara de uva por su contenido de hemicelulosa (57,66 %), mientras que la cáscara de guanábana presentó el mayor contenido de lignina (34,88 %). La literatura revisada mostró que *T. harzianum* produce enzimas como celulasas, xilanasas y lacasas, cuya actividad depende de factores como el sustrato, la temperatura, el pH, la humedad y la disponibilidad de oxígeno.

Palabras clave: *Trichoderma harzianum;* residuos frutícolas; biodegradación; lignocelulosa; enzimas lignocelulolíticas; compostaje.

Abstract

The generation of waste from the fruit processing industry represents an environmental problem due to the accumulation of organic and lignocellulosic materials that may be difficult to valorize. In this context, the use of microorganisms with degradative capacity constitutes a biotechnological alternative to promote the transformation of these residues and their subsequent use in composting processes. The objective of this study was to analyze the degradative potential of *Trichoderma harzianum* on organic residues from the fruit industry, considering their composition, the factors that condition fungal activity, and the enzymatic mechanisms involved. A documentary study was conducted using a qualitative approach supported by descriptive statistical analysis of secondary data. The literature search was performed in databases such as Scopus, ScienceDirect, SciELO, Google Scholar, and other academic sources, applying previously established inclusion and exclusion criteria. From an initial set of 675 identified documents, 59 relevant documents were selected for analysis. The results showed important differences in residue composition. Passion fruit peel presented the highest cellulose content (75.10%), followed by mandarin peel (67.77%), whereas grape peel showed the highest hemicellulose content (57.66%) and soursop peel the highest lignin content (34.88%). The reviewed literature showed that *T. harzianum* produces enzymes such as cellulases, xylanases, and laccases, whose activity depends on factors including substrate characteristics, temperature, pH, moisture, and oxygen availability.

Keywords: *Trichoderma harzianum;* fruit waste; biodegradation; lignocellulose; lignocellulolytic enzymes; composting.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial ha incrementado la generación de residuos agroindustriales, especialmente en la industria frutícola, que es una de las más dinámicas y productivas a nivel global. Según la FAO, la producción mundial de frutas se sitúa en 952 millones de toneladas (Organización de las Naciones Unidas, 2024). Sin embargo, se estima que anualmente se desperdicia alrededor del 60% de los productos frutícolas, lo que resulta en una cantidad significativa de residuos de frutas (Jiménez et al., 2021). Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP), en Colombia, los alimentos que más se desperdician son las frutas y verduras, representando el 62% del total, lo que equivale a 6,1 millones de toneladas de residuos desechados (Minambiente, 2022).

En Aguachica, departamento del Cesar, este problema resulta de gran relevancia debido a la importancia del sector agroindustrial frutícola para la economía local, sumado a esto, se generan una cantidad significativa de estos residuos orgánicos. La gestión inadecuada de los residuos generados por esta industria contribuye significativamente en la contaminación ambiental, primordialmente a las liberaciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). En muchas regiones, la quema de estos residuos es común lo que conlleva generar emisiones de CO_2 y otros contaminantes tóxicos que afectan la calidad del aire y agravan los problemas ambientales (Aguiar et al., 2022).

Por otro lado, estos son frecuentemente vertidos sin tratamiento en terrenos o cuerpos de agua alterando las propiedades químicas y físicas del suelo, esta práctica genera vertidos incontrolados que contaminan el entorno lo cual la acumulación prolongada de estos residuos no tratados libera lixiviados y sustancias tóxicas reduce la fertilidad del suelo y afecta a los

ecosistemas locales comprometiendo la salud ambiental y la productividad agrícola (Panda et al., 2016).

Los residuos agroindustriales de frutas tienen un gran potencial para ser reutilizados en procesos como el compostaje, permite generar productos con valor agregado y recuperar por una estructura paralela ambientes degradados (Vargas & Peréz, 2018). No obstante, la reutilización directa de los residuos orgánicos de la industria frutícola se ve limitada debido a su elevado contenido de compuestos fenólicos, que generan efectos fitotóxicos, afectando negativamente el desarrollo de las plantas e incluso ocasionando su muerte (Méndez et al., 2018). Estos residuos están compuestos principalmente por fibras, que se dividen en fibra soluble que tiene fácil capacidad de disolución en agua como la pectina, y fibra insoluble, que incluye celulosa, hemicelulosa y lignina, con proporciones entre 2 y 9%, dependiendo de la fruta (Gómez et al., 2022).

Para transformar estos residuos en compost orgánico, es esencial degradar estos componentes fibrosos, en este contexto los hongos del género *Trichoderma* es reconocidos por su capacidad de producir grandes cantidades de enzimas extracelulares, tanto hidrolíticas como oxidativas que descomponen la celulosa y hemicelulosa en azúcares simples, facilitando la utilización de estos compuestos complejos como fuente de carbono para el crecimiento del hongo (Díaz et al., 2024; Mejía & Amaya, 2021). Desde esta perspectiva, la implementación de *Trichoderma harzianum* puede favorecer la degradación compuestos orgánicos agroindustriales, optimizando su manejo y reduciendo costos operativos (Moreno & De la Ascensión, 2024).

Si bien existe una amplia variedad de microorganismos con capacidad degradativa, es fundamental conocer la efectividad de cada cepa para aplicarlas correctamente, caracterizarlas

adecuadamente y analizar los mecanismos de acción involucrados en cada proceso. Estos procesos resultan fundamentales para optimizar la eficiencia degradativa del microorganismo ya que permite contar con resultados prometedores y conocer cómo es su comportamiento con el medio ambiente y materiales a degradar (Cortés et al., 2023). Por esta razón, se buscó identificar aquellos microorganismos con mejores características degradativas, esto permitió optimizar los resultados y minimizar los costos en las estrategias de manejo de residuos.

Esta revisión literaria no solo buscó brindar soluciones para reducir estos impactos ambientales que genera la mala gestión de los residuos orgánicos del sector frutícola en Aguachica, departamento de cesar, sino también promover la transición hacia modelos tecnológicos renovables mediante microorganismos autóctonos de zonas montañosas con capacidad degradadora, y la generación de productos de valor agregado. Tecnologías como el compostaje con *Trichoderma harzianum* pueden transferirse a la agroindustria y comunidades locales a través de capacitaciones, instalaciones a pequeña escala, y alianzas con instituciones educativas y organismos técnicos del Cesar, optimizando el manejo de residuos desechados, reduciendo costos operativos en tratamientos e insumos agrícolas, e incentivando bioproducto que mejoran la fertilidad del suelo.

En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué factores fisicoquímicos, metabólicos y enzimáticos influyen en el potencial degradativo de *Trichoderma harzianum* durante la transformación de residuos orgánicos de la industria frutícola para la producción de compost orgánico?

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Analizar el potencial degradativo de *Trichoderma harzianum* en residuos orgánicos de la industria frutícola, considerando los factores fisicoquímicos, metabólicos y enzimáticos que influyen en su transformación para la producción de compost orgánico.

1.1.2 Objetivos específicos

Clasificar los principales residuos de la industria frutícolas en función de su composición fisicoquímica, potencial de degradación y volumen de generación en procesos de compostaje orgánico.

Identificar los factores metabólicos que inciden en la degradación de residuos frutícolas por *Trichoderma harzianum*, considerando el papel de sus enzimas y las condiciones óptimas del proceso.

Analizar la eficiencia degradativa de *Trichoderma harzianum* frente a otros microorganismos nativos de montaña en la biotransformación de residuos frutícolas reportada en la literatura científica.

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1Composición de residuos de frutas

Los residuos provenientes de frutas están formados por una combinación de componentes estructurales y no estructurales. Entre los componentes estructurales destacan la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, que conforman la matriz principal de estos residuos (Rojas, 2023).

1.2.2 Residuos agroindustriales frutícolas

Los residuos de frutas son los materiales poco utilizados resultantes del consumo o procesamiento de estos, incluyen principalmente cáscaras, semillas, piel, pulpa no comestible, pedúnculos, entre otros. Estos residuos son fuentes importantes de compuestos bioactivos como vitaminas, minerales, fibra dietética, fitoquímicos (compuestos fenólicos, terpénicos, organosulfuros y nitrogenados) y ácidos grasos, que tienen múltiples beneficios para la salud y aplicaciones en diversas industrias como la alimenticia, farmacéutica, cosmética y química (Bacca et al., 2025).

Así mismo los compuestos fenólicos se destacan por ser una serie de metabolitos secundarios que están presentes en residuos agroindustriales provenientes de frutas y verduras, este compuesto es de gran valor debido a que se especializa por contar con la unión de uno o más grupos hidroxilos, poseen gran importancia por incluir flavonoides, taninos, ácidos fenólicos y lignanos que poseen una alta capacidad antioxidante (Alara et al., 2021).

Por otra parte, en residuos del sector agroindustrial, tales como cascaras, semillas y pulpas estos compuestos son de gran importancia debido a que cuentan con una fuente de biomoléculas bioactivas las cuales se le dan un valor agregado al ser aprovechables en distintos procesos de transformación tales como compostaje, producción de subproductos y biodegradación,

resaltando las altas concentraciones de polires y gran capacidad antioxidante (Pagano et al., 2021).

.

1.2.3 Composición de materiales lignocelulósicos

Los materiales lignocelulósicos están constituidos primordialmente por tres polímeros, entre ellos encontramos la celulosa, hemicelulosa y lignina.

Celulosa

Es un polímero lineal de unidades de D-glucosa conectadas por enlaces glucosídicos β-1,4, lo que le proporciona una estructura cristalina. Estas cadenas de celulosa se agrupan en fibrillas, que están débilmente unidas entre sí por enlaces de hidrógeno, lo que les proporciona cierta independencia estructural.

Hemicelulosa

Es un polisacárido complejo compuesto por diversos azúcares, incluyendo pentosas como xilosa y arabinosa, así como hexosas como manosa, glucosa y galactosa. A diferencia de la celulosa, la hemicelulosa tiene un peso molecular menor y presenta una estructura ramificada con cadenas laterales cortas, lo que facilita su hidrólisis. Funcionalmente, la hemicelulosa actúa como un enlace entre la lignina y la celulosa, contribuyendo a la dureza y cohesión del conjunto lignocelulósico.

Lignina

Por último, la lignina, es un polímero aromático complicado y amorfo, que se halla en la pared celular de las vegetaciones. Su función es proporcionar soporte estructural, impermeabilidad y protección frente a ataques microbianos y estrés oxidativo. Debido a su

naturaleza hidrofóbica y su estructura altamente ramificada, la lignina es insoluble en agua y difícil de degradar, lo que la convierte en un elemento importante para la resistencia y durabilidad de la biomasa vegetal (William, 2014).

1.2.4 Microorganismo degradadores *Trichoderma harzianum*

Trichoderma harzianum presente en ecosistemas terrestres y acuáticos, que destaca por su alta capacidad reproductiva y adaptación a condiciones ambientales extremas. En la rizosfera, este hongo compite por sustentos y área con otros microorganismos, sobresaliendo por su aplicación en el control biológico de patógenos y su potencial en la biorremediación de ambientes contaminados, donde despliega diversos mecanismos de degradación. Produce enzimas como celulasas, xilanasas y quitinasas, cruciales para descomponer residuos vegetales y desintoxicar el residuo de su carga fenólica inicial. (Argumedo et al., 2009).

1.2.5 Factores que afectan el potencial degradativo del *Trichoderma harzianum* en residuos frutícolas

El crecimiento y la actividad de *Trichoderma harzianum* están influenciados por diversos factores ambientales y nutricionales. La temperatura óptima para su desarrollo se sitúa entre 20 y 28 °C, con un pH ligeramente ácido (4.5 - 5.0) que favorece su metabolismo. La humedad adecuada y la disponibilidad de oxígeno son también cruciales para su proliferación y actividad enzimática. Además, este hongo muestra una notable capacidad para colonizar y degradar sustratos ricos en celulosa, almidón y aminoácidos, componentes abundantes en los residuos agroindustriales frutícolas (Romero et al., 2009).

1.2.6 Mecanismos Enzimáticos de *Trichoderma harzianum* en la degradación de residuos frutícolas

El *Trichoderma harzianum* degrada residuos frutícolas principalmente mediante la fabricación de enzimas hidrolíticas extracelulares que descomponen los mecanismos lignocelulósicos de estos residuos. Entre las enzimas clave se hallan las celulasas (exoglucanasas y endoglucanasas), glucanasas, quitinasas, pectinasas y proteasas, que actúan sobre la celulosa, hemicelulosa, quitina y otros polisacáridos presentes en las paredes celulares de los residuos vegetales, ahora el deterioro de la lignina se lleva a cabo mediante la acción conjunta de varias enzimas extracelulares, principalmente fenoloxidasas como las lacasas, y peroxidasas (Hernández et al., 2019; Hernández et al., 2019).

El conjunto de conceptos y conocimientos presentados en este marco teórico soportan la hipótesis general de esta investigación: “La eficiencia degradativa de este microorganismo en residuos orgánicos frutícolas depende de factores ambientales y nutricionales que modulan la producción y actividad de enzimas clave”, puesto que, la revisión de la literatura muestra que los residuos frutícolas contienen componentes importantes como celulosa, hemicelulosa y lignina, cuya degradación es difícil en condiciones normales, requiriendo el uso de microorganismos como *Trichoderma harzianum* para descomponer esta estructura compleja.

Además, la evidencia bibliográfica resalta que enzimas como celulasas, xilanasas y ligninasas son fundamentales para la ruptura de la matriz lignocelulósica, lo que valida la idea de que un manejo adecuado de las condiciones ambientales puede potenciar la capacidad degradativa del microorganismo. Asimismo, la eficiencia del proceso depende no solo de las características del microorganismo, sino también de variables como pH, temperatura y humedad, las cuales deben ser controladas para obtener los mejores resultados.

Por lo tanto, la hipótesis de que la capacidad degradativa de *Trichoderma harzianum* en residuos orgánicos frutícolas depende de variables metabólicas y la producción óptima de enzimas se sustenta en una base sólida, respaldada por estudios previos y el conocimiento de los mecanismos bioquímicos involucrados. Esta premisa orienta el diseño experimental y los análisis posteriores para confirmar que un control adecuado puede maximizar la eficiencia del proceso, promoviendo la valorización sostenible de residuos y contribuyendo a la reducción de impactos ambientales negativos en la agroindustria frutícola.

1.2.7 Fitotoxicidad de los lixiviados cítricos

Los lixiviados cítricos son líquidos que se obtienen a partir de la descomposición de residuos procedentes del sector agroindustrial. Estos poseen una gama de sustancias orgánicas como los terpenos, fenoles entre otros aptos para producir fitotóxicos en el suelo, en el momento que estos presentan disbiosis y carga orgánica de manera exuberante generando una estabilización que ocurre durante el proceso de compostaje (Raclavská et al., 2021).

Por otra parte, la generación de lixiviados no depende precisamente de la cantidad de sustratos si no, de la degradación de los residuos. Dado que las frutas como la papaya y sandía contienen mayor porcentaje de agua produciendo aumento en la formación de lixiviados (Barrena et al., 2014).

1.2.8 Mitigación de compuestos fenólicos mediante metabolismo fúngico

Los compuestos fenólicos son compuestos químicos que se encuentran de forma natural en muchos residuos de frutas, especialmente en cortezas, semillas, pulpas y lixiviados. Esto se debe a que pueden tener capacidad antioxidante y valor industrial, pero en la transformación del compostaje también pueden funcionar como limitantes del proceso porque en altas concentraciones pueden producir fitotoxicidad, o sea, pueden dañar la germinación de semillas, el crecimiento de las raíces y el crecimiento normal de las plantas. Por ello, un residuo frutal no puede ser aplicado directamente en el suelo, tiene que estabilizarse y desintoxicarse antes, adicionalmente la lignina y los compuestos fenólicos desactivan las enzimas lignocelulóticas. Dos Santos et al. (2019), señalan que *Trichoderma harzianum* puede descomponer y desintoxicar determinados compuestos presentes en los residuos orgánicos.

De este modo la mitigación de los compuestos fenólicos en los hongos se encuentra ligada a la generación de enzimas ligninolíticas, especialmente en lacasas, lignina peroxidasas y manganeso peroxidasas. estas enzimas son las encargadas de catalizar reacciones oxidativas que permitan debilitar estructuras aromáticas fuertes provenientes de la lignina y compuestos fenólicos ubicados en la biomasa vegetal. en relación con lo anterior las lacasas se encargan de oxidar los fenoles a través del uso del oxígeno molecular, a diferencia de las peroxidasas que emplean peróxido de hidrogeno para desintegrar las moléculas más complejas (Kumar & Chandra, 2020).

1.3 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN (ESTADO DEL ARTE)

La revisión bibliográfica permitió identificar y analizar los documentos científicos más relevantes que sustentan la investigación sobre la degradación de residuos agroindustriales mediante microorganismos, con especial énfasis en el hongo *Trichoderma harzianum*. Este microorganismo destaca por su capacidad para degradar materiales lignocelulósicos complejos, gracias a su sistema enzimático eficiente y su adaptabilidad a diversos sustratos, lo que le permite transformar estos residuos en productos de valor agregado como lo es el compost orgánico.

La literatura científica resalta el potencial biotecnológico de *Trichoderma harzianum* en procesos de degradación y valorización de residuos agroindustriales especialmente los de la industria frutícola, evidenciando su papel fundamental en la reducción del impacto ambiental y en la generación de productos útiles para la industria, este análisis crítico de fuentes especializadas establece un marco teórico robusto para el desarrollo de estrategias sostenibles orientadas al manejo integral de residuos agroindustriales del sector de frutas mediante biotecnologías microbianas.

En términos comparativos, Aguiar et al. (2022) resaltan que la inoculación con *Trichoderma harzianum* y otros microorganismos disminuye notablemente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes del manejo tradicional de residuos, como la quema y el acumulamiento inadecuado, esta investigación resalta la importancia de incorporar tecnologías biológicas en la gestión de residuos para disminuir su impacto ambiental, alineándose con los objetivos de fomentar prácticas agrícolas sostenibles y disminuir la contaminación.

Por otra parte, existen investigaciones preliminares que han identificado cepas nativas de *Trichoderma harzianum* con un alto potencial para descomponer materiales orgánicos, aprovechando al mismo tiempo los nutrientes disponibles para su propio crecimiento y desarrollo degradativo sobre residuos agroindustriales Díaz et al. (2024) identificaron Esta capacidad adaptativa supera a otros microorganismos nativos estudiados, como ciertas bacterias degradadoras identificadas por Toloza Sandoval. (2023) que, aunque útiles en compostaje, requieren condiciones más específicas para máxima eficiencia.

Durante años, investigaciones han demostrado que el uso de *Trichoderma harzianum* es una estrategia prometedora para la degradación y el manejo de residuos agroindustriales. Por ejemplo, Singh & Nain. (2014) destaco que este hongo produce enzimas como celulasas que descomponen fibras lignocelulósicas presentes en residuos frutícolas, facilitando su conversión en biocombustibles y compost.

En Colombia, las frutas y verduras constituyen aproximadamente el 62% del total de alimentos que se desperdician, según el Departamento Nacional de Planeación (DNP), el manejo inadecuado de estos residuos genera contaminación del suelo y agua, además de contribuir a las emisiones de GEI, Minambiente. (2022). Por lo cual es de vital importancia realizar estudios locales como el de evaluar el potencial del *Trichoderma harzianum* para abordar esta problemática mediante su capacidad para degradar compuestos lignocelulósicos presentes en los desechos agroindustriales.

A nivel nacional, se han identificado bacterias y hongos con potencial para descomponer materia orgánica, útiles en la elaboración de compostaje doméstico, según Toloza Sandoval.

(2023) la combinación de *Trichoderma harzianum* con estas bacterias podría optimizar la gestión de residuos agroindustriales y contribuir a la sostenibilidad ambiental, resaltando la importancia de las interacciones microbianas en los procesos de degradación y compostaje.

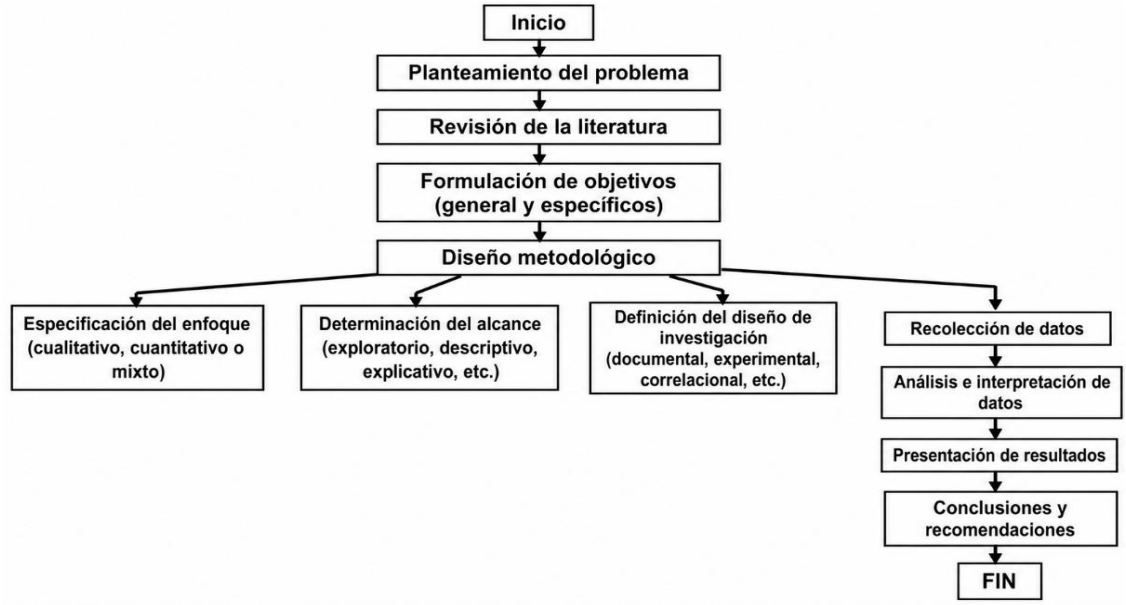
Adicionalmente, estudios como los de Amaya Lema y Mejía Pérez (2021) compararon la acción conjunta de *Trichoderma harzianum* y *Aspergillus sp* en la degradación de sustratos orgánico, como el bagazo de caña, demostrando que la eficiencia enzimática depende no solo del microorganismo sino también de factores ambientales como el pH, la temperatura, la relación carbono/nitrógeno y la aireación. Estos hallazgos ofrecen un marco fundamental para la optimización de procesos industriales y contrastan con investigaciones que se centran exclusivamente en el potencial enzimático individual de *Trichoderma harzianum* Hernández-Melchor et al. (2019).

2 DISEÑO METODOLÓGICO

La metodología permitió establecer el procedimiento para abordar la problemática ambiental generada por la acumulación y el manejo inadecuado de los residuos agroindustriales, especialmente los provenientes de la industria frutícola. A través de ella fue posible seleccionar las técnicas más adecuadas para el análisis y aprovechamiento de estos residuos, garantizando un desarrollo ordenado de la investigación. Además, este proceso facilitó la organización de la información y la evaluación del potencial degradativo de *Trichoderma harzianum,* facilitando así la obtención de resultados válidos y pertinentes que contribuyan directamente al objetivo general de la investigación el cual es analizar el potencial degradativo de *Trichoderma harzianum* en residuos orgánicos de la industria frutícola, considerando los factores fisicoquímicos, metabólicos y enzimáticos que influyen en su transformación para la producción de compost orgánico.

Ilustración 1

Descripción general del proceso metodológico



Fuente: Autores

2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

2.1.1 Enfoque de la investigación

El enfoque de la presente investigación es cualitativo con análisis estadístico descriptivo de datos secundarios, utilizando esta información para lograr una comprensión integral del potencial degradativo de *Trichoderma harzianum* en residuos de la industria frutícola.

Así mismo basándonos en este enfoque se realizó una revisión crítica de la literatura para analizar variables como el tipo de residuos a degradar, los principales componentes estructurales (celulosa, hemicelulosa, lignina) y las enzimas que producen el hongo, como quitinasas y celulasas, que intervienen en la degradación de estos componentes, permitiendo interpretar los mecanismos biotecnológicos relacionados con el problema ambiental y orientados a proponer soluciones sostenibles (Hernández et al., 2014).

En este sentido, para la formación del enfoque mencionado anteriormente se elaboró una revisión sistemática en contribución de la literatura existente en diversas bases de datos académicas, que tengan como propósito el estudio de variables que afectan el crecimiento y la actividad del hongo, entre ellos se incluyen:

TABLA 1: *variables e indicadores relacionados al potencial degradativo del Trichoderma harzianum en residuos frutícolas.*

Variable	Indicador	Unidad
Actividad enzimática	Celulasas, xilanasas, lacasas	U/mL
Porcentaje de degradación	Reducción porcentual de masa del residuo a lo largo del tiempo	%
Crecimiento micelial	Diámetro de la colonia micelial en placas de cultivo	mm
Producción de biomasa	Biomasa seca obtenida tras filtración o centrifugación	g/L de biomasa seca
pH	Valor de acidez o alcalinidad en el medio de cultivo	pH
Concentración de inóculo	Cantidad de esporas o biomasa micelial aplicada	esporas /mL
Concentración del sustrato	Concentración de material orgánico en el medio de cultivo	g/L o %
Eficiencia degradativa	Relación porcentual entre masa degradada y masa inicial	%

Fuente: elaboración propia

Este parámetro suministrado a partir de la literatura permite tener un análisis cuidadoso y así proponer soluciones sostenibles en el uso de *Trichoderma harzianum* en la gestión de residuos (Hernández et al., 2019; Romero et al., 2009). De este modo posibilita un estudio más profundo y fundamentado respecto al fenómeno, favoreciendo la coherencia de la información y contribuyendo al alcance de la meta general de la investigación.

2.1.2 Alcance de la investigación

El alcance de esta investigación es básico de nivel descriptiva-explicativa. Es básica porque buscó ampliar el conocimiento teórico sobre el potencial degradativo de *Trichoderma harzianum* y su aplicación en la gestión de residuos de la industria frutícola, sin desarrollar una aplicación práctica ni intervención directa en campo, limitándose al análisis y síntesis de la literatura científica existente.

De nivel descriptiva-explicativa, ya que inicialmente se recopiló, organizó y describió información sobre la composición de los residuos de la industria frutícola, las características del microorganismo *Trichoderma harzianum* y el contexto ambiental y productivo en el que se desarrolla la investigación. A partir de esta base, se profundizará en el análisis de los procesos de degradación efectuado por dicho microorganismo, explicando cómo este actúa sobre los residuos de la industria frutícola, así como los factores que influyen en su eficiencia degradativa eficiencia y una comparación con otros microorganismos para ofrecer una explicación integral más allá de la simple descripción (Hernández et al., 2019).

2.1.3 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño implementado en esta investigación es de tipo documental, orientado a analizar el potencial degradativo de *Trichoderma harzianum* en residuos agroindustriales de la industria frutícola. La monografía se desarrolló mediante cinco fases.

1. En la primera se definió el problema de investigación se establecieron los objetivos verificando su correspondencia con el problema planteado con el potencial degradativos del *Trichoderma harzianum* mediante residuos frutícolas.

2. Para la segunda fase el estudio se dirigió a la recopilación de datos mediante la

búsqueda en fuentes bibliográficas confiables, así como análisis y síntesis en revistas científicas relevantes, obteniendo información importante y confiable en la construcción de un marco teórico sólido y actualizado sobre el tema sin la necesidad de realizar una experimentación directa como producto de esta fase se obtuvo el conjunto de documentos utilizado para la construcción del marco teórico y desarrollo de la investigación.

3. Así mismo en la tercera fase se desarrolla todo el proceso de seleccionar y organizar la información, clasificando la información obtenida mediante factores como actualidad, relación al tema entre otros factores, que posteriormente los datos se llevaron a cabo mediante matrices y tabulaciones permitiendo organizar la información de manera más detallada y organizada.

4. De este modo para la cuarta fase se basó en análisis y síntesis documental, lo que permitió analizar los resultados obtenidos en la literatura para distinguir la composición de los residuos frutícolas, condiciones óptimas de degradación del *Trichoderma harzianum* y así mismos factores metabólicos.

5. En la última fase se completaron los resultados obtenidos por medio del estudio documental y se realizaron las conclusiones por medio de los objetivos específicos planteados.

Por otra parte, es significativo mencionar que mediante la revisión y recopilación de datos extraídos de la literatura se pudieron identificar variables muy importantes que afectan el crecimiento y la actividad del microorganismo, así mismo lograr comprender el funcionamiento

biotecnológico en el proceso degradativo de los residuos. Esta perspectiva facilita obtener un análisis crítico y estructurado, el cual ayuda a la obtención del objetivo general aportando soluciones prácticas y sostenible para la gestión de residuos frutícolas (Hernández et al., 2019; Romero et al., 2009).

Para verificar la calidad y rigurosidad de las fuentes bibliográficas utilizadas, se analizó la procedencia académica de los documentos, la finalidad de la información en base a la esencia de estudio, actualidad de publicación de los documentos, autores, revisas científicas, artículos y demás con el fin de analizar y filtrar solo aquella información con calidad y solidez la cual sea importante en el desarrollo del trabajo de investigación.

2.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

2.2.1 Población

La población, según Sampieri et al. (2014), se define como el conjunto total de elementos que comparten una o varias características y que son objeto de estudio en una investigación. En este caso, la población de este estudio está conformada por los documentos científicos y técnicos que abordan la degradación de residuos agroindustriales frutícolas mediante microorganismos, con énfasis en *Trichoderma harzianum*. Para delimitar esta población, se realizó una búsqueda sistemática en las bases de datos Scopus, ScienceDirect, Scielo, WebSite y Google Scholar, utilizando la ecuación de búsqueda "Agroindustry AND Biotechnology AND Organic AND Microorganisms AND Degradation AND Wastes AND fruit AND *Trichoderma harzianum*" aplicando los siguientes filtros:

Idioma: español e inglés.

Tipo de documento: Artículos científicos, tesis, informes técnicos y revisiones o

literatura relevante.

Periodo de publicación: 2015-2025.

Acceso a texto completo.

Como resultado de la aplicación de estos criterios y tras la eliminación de duplicados y la revisión de pertinencia de títulos y resúmenes, la población final quedó conformada por 675 documentos únicos. Estos incluyen artículos publicados en revistas indexadas, tesis de grado y posgrado, libros especializados, estos documentos están especialmente relacionados con la degradación de residuos frutícolas mediante el uso de microorganismos, en particular *Trichoderma harzianum*, aplicado en diversos procesos como la elaboración de compost, la producción de biocombustibles y otras tecnologías de valorización de residuos.

Adicionalmente, se recopiló informes técnicos de organismos nacionales e internacionales, como la FAO, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente) y el Departamento Nacional de Planeación (DNP), con el propósito de obtener datos y porcentajes sobre la cantidad de residuos generados a nivel global y nacional, lo que permite comprender de manera más profunda la problemática de raíz asociada a la gestión de estos residuos.

2.2.2 Muestra

La muestra, según Hernández Sampieri et al. (2014), es un subgrupo representativo de la población objeto de estudio. Este estudio es de tipo no probabilístico por criterio o intencionada, ya que la selección de los documentos no se realiza de manera aleatoria, sino que responde a parámetros específicos que garantizan la pertinencia y calidad de la información, por ende, la muestra quedó conformada por 59 documentos científicos obtenidos mediante un

muestreo no probabilístico, estos documentos cumplieron los criterios requeridos para ser tenidos en cuenta en la elaboración de la tesis.

En consecuencia, de la población inicial de documentos, se seleccionaron aquellos que cumplían con criterios relacionados con el tema de la investigación, la solidez científica, el año de publicación (máximo 10 años) y la coherencia con los objetivos planteados. Se descartaron los artículos duplicados, con información insuficiente o que no abordaban específicamente el papel de *Trichoderma harzianum* en la degradación de residuos agroindustriales frutícolas. Para complementar la rigurosidad del estudio, se llevó a cabo un análisis bibliométrico utilizando la herramienta VOSviewer, que permite identificar las palabras clave y los autores más relevantes mediante gráficas basadas en los documentos obtenidos con la ecuación de búsqueda.

En este sentido, se utilizó la base de datos Scopus para el análisis bibliométrico, ya que arrojó el mayor número de resultados de documentos en comparación con otras plataformas, esta elección se fundamenta en su amplia cobertura y calidad en la indexación de publicaciones científicas, lo que la convierte en una herramienta de referencia confiable para estudios de carácter bibliométrico.

2.3 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para asegurar la confiabilidad, rigurosidad y calidad en la obtención de información, se aplicó una metodología basada en la revisión de la literatura lo cual consiste en una búsqueda sistemática de artículos científicos, tesis, informes técnicos y publicaciones especializadas que se encuentran disponibles en bases de datos reconocidas, tales como Scopus, ScienceDirect, Scielo, Google Scholar y repositorios institucionales (Grijalva et al., 2019). Se prestó especial énfasis a documentos que aborden el potencial degradativo de *Trichoderma harzianum* en residuos orgánico de la industria frutícola, incluyendo sus mecanismos enzimáticos, los factores

ambientales que influyen en su eficiencia, y comparaciones con otros microorganismos autóctonos relevantes.

Durante el proceso de revisión se implementó un protocolo de control de calidad que estableció criterios claros para la selección y exclusión de documentos. Se consideraron únicamente aquellos estudios que cumplan con los siguientes requisitos: estén directamente relacionados con los objetivos establecidos, que sean de carácter académico o técnico, incluyendo artículos científicos, tesis y reportes publicados en revistas indexadas, que el idioma sea en español o inglés, que hayan sido publicados entre 2015 y 2025, y que dispongan de acceso completo al texto para un análisis detallado.

2.4 ANÁLISIS Y TABULACIÓN DE DATOS

Una vez obtenidos los documentos seleccionados se organizó en una matriz analítica documental elaborado en Excel, que contiene datos relevantes tales como autor(es), año de publicación, título, aportes significativos al tema, observaciones y la fuente consultada (como se muestra Anexo 1). Esta matriz permitió estructurar y confrontar la información considerando tres aspectos principales: Contextualización, que incluye materias primas y procesos utilizados; Metodología, que describe las técnicas, procedimientos y pretratamientos aplicados; y Resultados, comprendiendo análisis de hallazgos, innovaciones tecnológicas y enfoques relevantes. Esta sistematización facilito la identificación de tendencias, lagunas en el conocimiento y perspectivas importantes para el desarrollo de la investigación.

2.5 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Objetivo 1: Clasificar los principales residuos de la industria frutícolas en función

de su composición fisicoquímica, potencial de degradación y volumen de generación en procesos de compostaje orgánico.

Este objetivo se desarrolló bajo una serie de pasos, primero, se realizó una búsqueda exhaustiva y una selección crítica de información científica y técnica pertinente sobre la composición fisicoquímica, y volumen de desechos generados relacionando cuales son las frutas que más perdidas sufren y sus principales residuos orgánicos en la industria frutícola. Se examinaron componentes como celulosa, hemicelulosa, lignina, y otros elementos bioactivos. Luego, se organizó esta información en una matriz clasificándose según propiedades fisicoquímicas relevantes para la degradación biológica, enfatizando la correlación entre su composición, capacidad de biodegradación y volumen de desechos formados (como se muestra en la Tabla 2). Por último, se identificaron y priorizaron los componentes más importantes, con base en su potencial para ser descompuestos por microorganismos, especialmente por *Trichoderma harzianum*, sustentado en referencias bibliográficas.

Objetivo 2: Identificar los factores metabólicos que inciden en la degradación de los residuos de frutas efectuado por *Trichoderma harzianum*, incluyendo el papel de sus enzimas y condiciones óptimas de degradación.

Para cumplir con este objetivo se dividió en 3 etapas, primero, se realizó una revisión documental minuciosa enfocada en los factores metabólicos que influyen en la degradación de residuos frutícolas por *Trichoderma harzianum,* con el objetivo de comprender cómo cada uno de estos factores afecta el proceso de descomposición, luego la información recopilada se organizó en una matriz, como se muestra en la Tabla 3.

Segundo, se llevó a cabo una revisión documental minuciosa sobre las condiciones fisiológicas y bioquímicas óptimas que favorecen la actividad de *Trichoderma harzianum*. Se recopilaron datos relacionados con variables metabólicas clave como temperatura, pH, humedad y disponibilidad de oxígeno, fundamentales para la eficiencia del microorganismo (Tabla 4).

Tercero y último, se profundizo en las enzimas hidrolíticas que participa en la degradación lignocelulósica, tales como celulasas, xilanasas y lacasas, evaluando su producción y función (Como se muestra en la Tabla 5). Además, se analizaron comparaciones de eficiencia enzimática y metabólica en diferentes condiciones ambientales, con el propósito de identificar los parámetros óptimos para aplicaciones prácticas.

Objetivo 3: Analizar la eficiencia degradativa de *Trichoderma harzianum*, según estudios reportados frente a otros microorganismos nativos de montaña en la biotransformación de residuos de frutas de la industria frutícola.

Para lograrlo, se buscó, se leyó, se recopilaron y analizaron críticamente estudios que evalúan la capacidad degradativa en residuos orgánicos de hongos y bacterias nativos, con el fin de comparar su eficiencia degradativa frente a la del *Trichoderma harzianum*. Se construyó una matriz comparativa con parámetros como porcentaje de degradación, velocidad del proceso, tipo de residuo utilizado y condiciones experimentales (Tabla 6). Esta matriz permitió identificar ventajas, limitaciones y potenciales sinergias entre microorganismos, proporcionando una base sólida para recomendaciones en el diseño de estrategias biotecnológicas eficientes para compostaje de residuos orgánicos frutícolas.

2.6 HIPÓTESIS Y VARIABLES

Objetivo 1

Para la resolución del primer objetivo se propuso la siguiente hipótesis: "La composición fisicoquímica y estructural de los principales residuos de frutas generados en la industria frutícola presenta características químicas y físicas que permiten su degradación eficiente por parte de *Trichoderma harzianum*."

Variable independiente: Composición fisicoquímica y estructural de los residuos de frutas frutícolas.

Variable dependiente: Potencial degradativo de *Trichoderma harzianum* sobre dichos residuos.

Variables cualitativas específicas:

Tipo de compuesto (celulosa, hemicelulosa, lignina, etc.).

Estado físico del residuo (fibroso, compacto, fragmentado).

Variables cuantitativas específicas:

Concentración porcentual de celulosa, hemicelulosa y lignina (% en peso).

pH y humedad del residuo.

Objetivo 2

Para el segundo objetivo se propuso la siguiente hipótesis "Las condiciones ambientales y metabólicas (temperatura, pH, humedad, concentración de inóculo) y la producción enzimática de *Trichoderma harzianum* determinan la eficiencia de la degradación de residuos

orgánico de la industria frutícola."

Variable independiente: Factores metabólicos (temperatura, pH, humedad, concentración de inóculo).

Variable dependiente: Eficiencia de la degradación de residuos por *Trichoderma harzianum* (evaluada mediante producción enzimática y porcentaje de degradación).

Variables cualitativas específicas:

Tipo de enzimas producidas (celulasas, xilanasas, lacasas, etc.)

Condiciones de cultivo (aireación, tipo de sustrato).

Variables cuantitativas específicas: Temperatura (°C), pH, Humedad (%), Concentración del inóculo (esporas o biomasa/mL o g), Actividad enzimática (U/mL), Porcentaje de degradación (%) del residuo.

Objetivo 3

Para el tercer y último objetivo se planteó la hipótesis "*Trichoderma harzianum* presenta una eficiencia degradativa superior en comparación con otros microorganismos nativos de montaña para la biotransformación de residuos orgánico de la industria frutícola, facilitando la producción de compost orgánico de alta calidad."

Variable independiente: Tipo de microorganismo (*Trichoderma harzianum* vs otros microorganismos nativos de montaña).

Variable dependiente: Eficiencia degradativa efectuada

Variables cualitativas específicas:

Tipo de microorganismo (hongo, bacteria), Tipo de residuo utilizado (frutas, verduras, mezcla).

Variables cuantitativas específicas:

Porcentaje de degradación (%) en un tiempo determinado, Tiempo para alcanzar el porcentaje de degradación, Parámetros de calidad del compost (relación C/N, contenido de nutrientes, pH).

~~3~~ DESARROLLO DEL TEMA

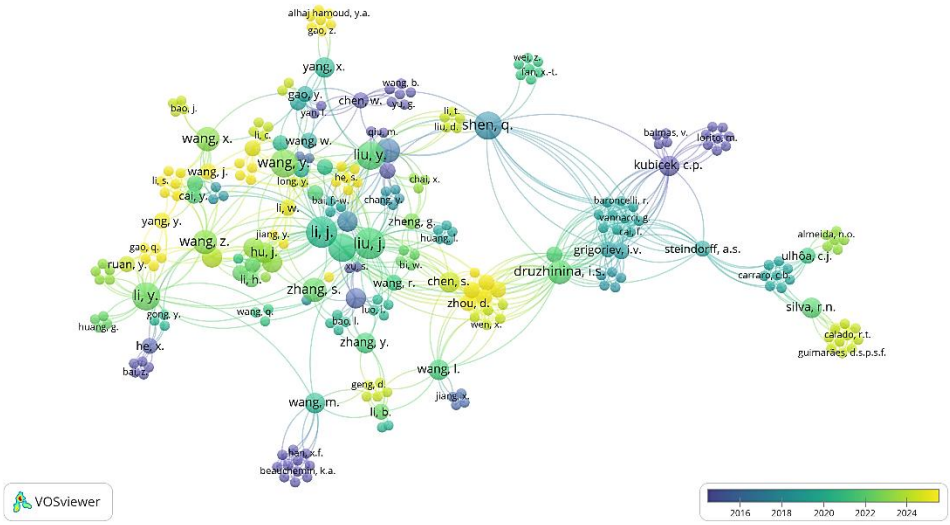
Para cumplir con cada uno de los objetivos planteados, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de literatura en diversas bases de datos científicos, conforme se detalla en la sección de metodología. Los documentos identificados mediante la ecuación de búsqueda predefinida fueron sometidos a criterios de inclusión y exclusión (filtros), asegurando su relevancia para el estudio. Además, se utilizó el software VOSviewer para realizar un análisis bibliométrico con el propósito analizar el panorama actual de la investigación científica sobre la capacidad de *Trichoderma harzianum* para descomponer materia orgánica, con énfasis en desechos de la agroindustria frutícola, con aproximadamente 340 documentos obtenidos de la base de datos Scopus.

Este análisis generó gráficos y mapas de coocurrencia que revelan las interrelaciones entre autores, temas y palabras clave, estos visuales facilitan la identificación de patrones colaborativos y tendencias temáticas, como clústeres de investigación sobre biodegradación efectuada por microorganismos. Finalmente, todos los documentos seleccionados se sistematizaron en una matriz analítica desarrollada en Microsoft Excel, facilitando el procesamiento y síntesis de la información.

3.1 Análisis bibliométrico con la herramienta VOSviewer

Ilustración 2

Mapa de red de coautoría de autores con superposición temporal (2015 - 2025)



Nota: Elaborado mediante análisis bibliométrico en VOSviewer a partir de los documentos recuperados en Scopus.

La Ilustración 2 muestra una red en la que las dinámicas de investigación no aparecen fragmentadas, sino más bien articuladas en torno a ciertos autores que concentran gran parte de la producción y las comunicaciones. Nombres como Shen, Q., Li, J. o Liu, J. destaca no sólo por el tamaño de sus nodos, sino también por actuar como puntos de convergencia en trabajos relacionados con procesos de biodegradación y aprovechamiento de residuos orgánicos. Esto sugiere que el progreso en esta área depende de los logros de los grupos más que de las contribuciones individuales.

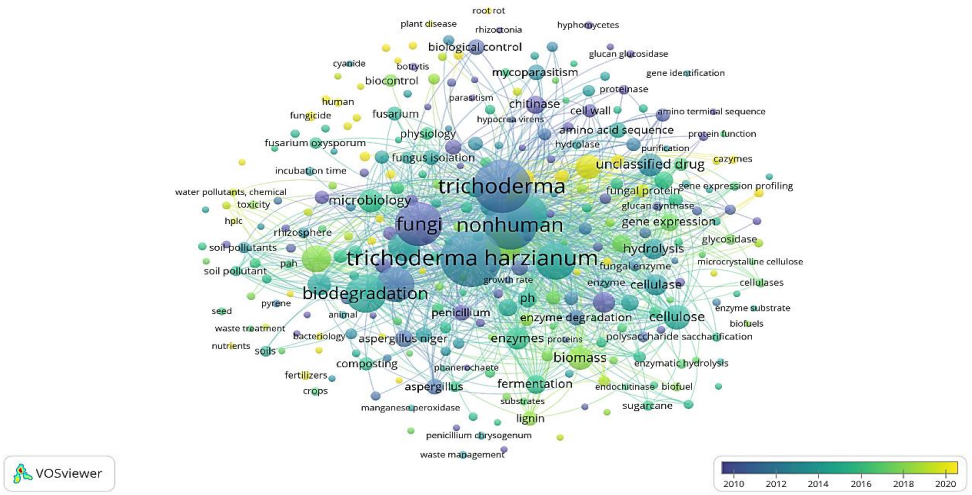
La división por colores revela comunidades que, aunque cercanas, no son idénticas en su enfoque. Algunos avanzan más hacia la microbiología aplicada, con énfasis en los hongos y

su capacidad de descomposición, mientras que otros se adaptan a los procesos de conversión de residuos y a la producción de compost. Esta densidad entre conglomerados indico que el desarrollo no se produce en líneas separadas, sino en puntos de contacto donde se cruzan lo microbiológico y lo tecnológico.

Las conexiones entre nodos no son uniformes. Hay áreas densas con más conexiones, lo que refleja una cooperación continua, y otras áreas más dispersas donde hay menos intercambio. Esto da como resultado notar cuán consolidado está el grupo dentro del tema. La línea de tiempo refuerza esta lectura: los últimos tonos se concentran en industrias donde el interés parece estar cambiando hacia enfoques más aplicados, particularmente en el uso de microorganismos para mejorar la eficiencia de la transformación de residuos.

Ilustración 3

Mapa de coocurrencia de términos (visualización de red bibliométrica de palabras clave, 2015-2025)



Nota: Elaborado con VOSviewer a partir de los registros de Scopus.

En la ilustración 3, la red ya no gira en torno a los autores, sino en torno a los conceptos que estructuran la conversación científica. Lo primero que aparece es el núcleo de *Trichoderma harzianum*, rodeado de términos como biodegradación, celulosa, degradación enzimática y biomasa. No se trata sólo de frecuencia: es señal de que el interés está centrado en comprender cómo estos microorganismos actúan directamente sobre matrices orgánicas complejas, especialmente aquellas ricas en compuestos lignocelulósicos.

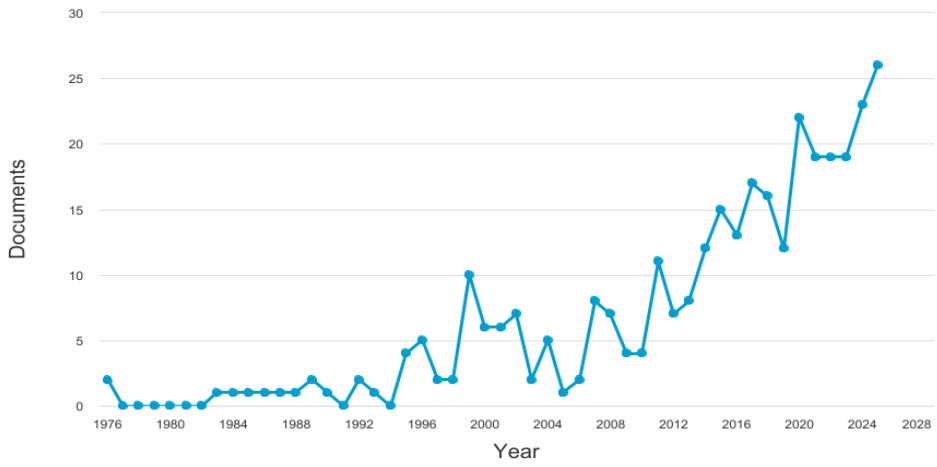
Alrededor de este núcleo se forman zonas bien marcadas. Por un lado, hay términos más relacionados con aspectos microbiológicos y fisiológicos del organism**o** tales como hongos, microbiología, fisiología, microparasitismo, que indico una comprensión del organismo y su comportamiento. Por otro lado, hay un bloque más orientado a procesos tales como los de fermentación, compostaje, biomasa, celulosa; donde el foco está en la transformación de residuos. No están separados: se tocan constantemente, lo que deja claro que la eficiencia del proceso depende tanto del organismo como del sustrato.

También hay una capa más específica que utiliza conceptos como expresión génica, hidrólisis o actividad enzimática. Ahí la conversación desciende y trata de explicar los mecanismos que mantienen esa capacidad degradante. Este no es un detalle insignificante, porque es precisamente en el nivel donde se comienza a regular el desempeño del sistema. La línea de tiempo muestra un cambio interesante. Los términos más nuevos se centran en enfoques más funcionales con énfasis en la actividad enzimática y la transformación de biomasa, mientras que los más antiguos se agrupan en torno a descripciones generales del hongo y su ecología. En general, la red revela un área que ha reducido su enfoque: desde comprender el organismo hasta intervenir más directamente en cómo y qué tan bien descompone los desechos orgánicos.

3.2 Análisis bibliométrico en Scopus

La grafica 1 muestra cómo ha evolucionado anualmente los documentos indexados en la base de datos Scopus entre 1976 y 2026, con un crecimiento en la última década.

Grafica 1: *Número de documentos por año según Scopus (1976-2026)*



Fuente: Obtenido de la base de datos Scopus.

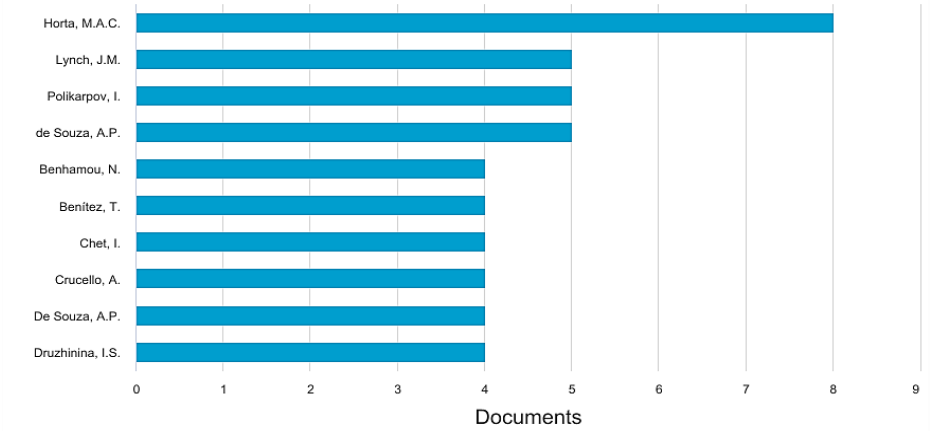
Al analizar los resultados expuestos en la gráfica 1, se encontró que, al comienzo de la serie, desde 1976 hasta los inicios de los años noventa, los documentos publicados en este lapso son muy bajo, con varios años en cero y unos con apenas uno o dos trabajos publicados, esto demuestro que, el tema de investigación era poco estudiado o, al menos, tenía poca visibilidad en la base de datos. A partir de la década de 1990 se aprecia un cambio claro en la tendencia: los puntos comienzan a alejarse del eje horizontal y se observó picos aislados en la serie temporal. Esta variación indico que, en esos años, la producción científica deja de ser prácticamente nula y aparecen las primeras contribuciones esporádicas sobre el tema.

Entre comienzos de la década del 2000 y alrededor de 2010 se evidencio un incremento más claro en el número de publicaciones anuales. Aunque la serie presenta variaciones de un año a otro, la dirección general es ascendente, lo que indico una consolidación paulatina del

campo de estudio y un interés cada vez mayor por parte de la comunidad científica. A partir de 2010 el crecimiento se vuelve más sostenido: los registros superan con frecuencia los cinco documentos por año y se van alcanzando máximos progresivos. Este comportamiento puede relacionarse con el fortalecimiento de grupos de investigación especializados, el aumento de oportunidades de financiación y la inclusión del tema en agendas científicas de mayor alcance.

En el último tramo, aproximadamente entre 2015 y 2026, el ritmo de producción se aceleró aún más, pasando de valores cercanos a una decena de trabajos anuales a cifras que sobrepasan las veinte publicaciones por año, hasta llegar a un máximo cercano a veintiséis documentos en 2026. Esta evolución sugirió que el campo ha entrado en una fase de madurez y alta productividad, caracterizada por un interés consolidado y por la diversificación de enfoques metodológicos y temáticos en torno a la problemática analizada. La gráfica 2 "Documentos por autor" muestra el número de publicaciones indexadas en Scopus para los principales autores en la temática investigada.

Grafica 2: *Número de documentos por autor según Scopus (1976-2026)*



Fuente: Obtenido de la base de datos Scopus.

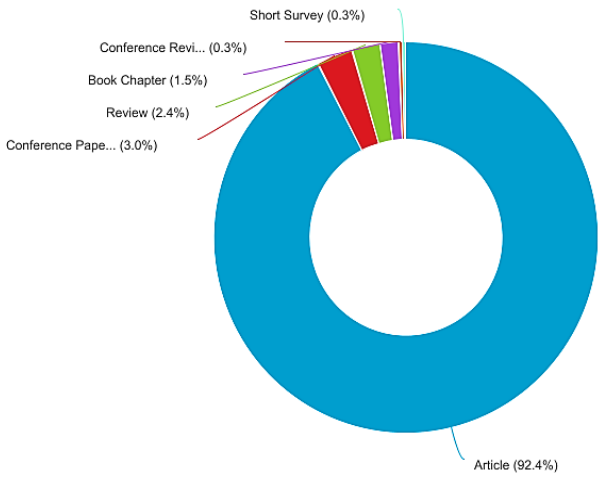
Tal como puede apreciarse en la gráfica 2 el investigador Horta, MAC es el que más cuenta con documentos publicados, lo que demuestra su alta productividad y relevancia académica en este campo investigativo. Seguido existe otro grupo de autores, integrado por Lynch, JM, Polikarpov, I. y de Souza, AP, los cuales cuentan con cinco publicaciones cada uno, esta cantidad posiciona a dichos investigadores como referentes importantes, aunque en un nivel de producción algo inferior al autor principal. Estos resultados sugieren la existencia de equipos o redes de colaboración que logran publicar regularmente, contribuyendo de manera sostenida al avance del área.

En la parte inferior de la gráfica se muestra oro grupo de autores conformado por, Benhamou, N., Benítez, T., Chet, I., Crucello, A., De Souza, AP, y Druzhinina, IS, cada uno con cuatro contribuciones o documentos, aunque es una cantidad menor en relación con los autores anteriores, su presencia indico que existe un grupo de investigadores que participan activamente con esta línea de investigación, ayudando a fortalecer la disciplina y aportando variedad de enfoques y resultados. La existencia de varios autores con producciones similares es señal de un campo de investigación en expansión, donde no solo unos pocos líderes generan el conocimiento, sino que cada vez más colaboradores de distintas regiones fomentan el crecimiento científico.

La gráfica 3 de dona muestra la distribución porcentual de los tipos de documentos indexados en Scopus para una consulta determinada, donde cada segmento representa una fracción del total que suma 100%. En este caso, la categoría predominante es “Article”, que concentra aproximadamente el 92,4% de los registros, lo que indico que la evidencia recuperada proviene casi en su totalidad de artículos de revistas científicas. Las demás categorías aparecen en proporciones minoritarias: “Conference Paper” alrededor de 3,0%, “Review” 2,4%, “Book

Chapter” 1,5%, y tipos muy poco frecuentes como “Conference Review” y “Short Survey”, con cerca de 0,3% cada una.

Grafica 3: *Número de documentos por tipo según Scopus (1976-2026)*



Fuente: Obtenido de la base de datos Scopus.

En términos metodológicos para esta monografía, la distribución que muestra la gráfica 3 sugiere que el estado del arte debe enfocarse en artículos científicos de revistas, dado que representa la cantidad más significativa de fuentes y actualizada de conocimiento disciplinar. No obstante, vale la pena incorporar selectivamente documentos de conferencia para captar líneas emergentes y avances preliminares, así como artículos de revisión y capítulos de libro para obtener síntesis teóricas y marcos conceptuales que complementen el análisis.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Objetivo 1: Clasificar los principales residuos de la industria frutícolas en función de su composición fisicoquímica, potencial de degradación y volumen de generación en procesos de compostaje orgánico.

3.3.1.1 Composición fisicoquímica de los Residuos de la Industria Frutícolas

En la tabla 2 se muestra la composición fisicoquímica de los residuos de la industria frutícola, donde se destacan las fracciones estructurales de celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos componentes determinan cómo se produce la degradación, al igual que determinan la disponibilidad de sustrato y la actividad de los sistemas enzimáticos. En este sentido, la matriz no sólo organiza los datos, sino que también permite una lectura más clara de qué tan sensible es cada residuo a los procesos de degradación, en función de la proporción y distribución de estos compuestos, así mismo la matriz nos permite saber de manera más detallada el volumen de desechos generados en la industria frutícola, conociendo de este modo la cantidad de residuo para trabajar.

A partir de esta información, es posible comprender mejor por qué algunos materiales son más fáciles de transformar que otros y cómo su composición afecta directamente a la dinámica del proceso.

La matriz adjunta compila datos sobre la composición química de diversos residuos agroindustriales lignocelulósicos, destacando porcentajes de celulosa, lignina, hemicelulosa y otros componentes, con referencias a estudios científicos relevantes. Esta información proviene de fuentes como Castañeda-Niño et al. (2024) para pseudotallo de banano y Rojas González

(2023) para cáscaras de frutas tropicales colombianas, lo que permite una comparación sistemática útil en el análisis de subproductos para procesos de biodegración o valorización.

Tabla 2*: Composición Fisicoquímica de los Residuos de la industria Frutícolas*

Autor	Tipo de Residuo	Celulosa (%)	Lignina (%)	Hemicelulosa (%)	Otros	N.º de toneladas desechadas
Cueva-Orjuela et al. (2017); Vargas Isaza et al. (2019)	Bagazo de caña de azúcar	34,5	18,9	22,4	20,7 xilano	6.000.000 t/año
(Gómez et al., 2020).	Fibras de coco	46	33	8	12 agua	Cascara 38.890
Rojas González, A. F. (2023)	Cascara maracuyá	75.10	11.70	13.35	20–30 ms = materia seca	Cascara 1754.00
Rojas González, A. F. (2023	Cascara Mandarina	67.77	8.712ta	23.52	18-30 ms = materia seca	Cascara 13.44
R$_o$jas González, A. F. (2023)	Cascara guanábana	51.10	34.88	14.01	31.98ms = materia seca	Cascara 18.00
Rojas González, A. F. (2023)	Cascara lulo	36.80	33.13	30.07	14.79 ms = materia seca	Cascara 24.80

Autor	Tipo de Residuo	Celulosa (%)	Lignina (%)	Hemicelulosa (%)	Otros	N.º de toneladas desechadas
Rojas González, A. F. (2023)	Cascara tomate de árbol	32.97	18.12	48.91	17.04 ms= materia seca	Cascara 9.86 Semilla 4.48
Rojas González, A. F. (2023)	Cascara uva	38.15	4.19	57.66	67.70 ms = materia seca	No reportado
Rojas González, A. F. (2023)	Cascaras de mango	55.31	23.98	20.71	3.5 – 4.5 pH	Cascara 480.45
(Castañeda – Niño et al, 2024)	Pseudotallo Banano	56 – 60	19 – 20	43	30 -40 fibra cruda	No reportado

Fuente: Adaptado de Amaya Lema & Mejía Pérez. (2021)

En términos de celulosa, los residuos presentados en la tabla 2 muestran variaciones significativas, desde un 32.97% en la cáscara de tomate de árbol hasta un 75.10% en la cáscara de maracuyá, con un promedio aproximado de 48-50% en la mayoría de las muestras. La lignina oscila entre 4.19% en cáscara de uva y 34.88% en cáscara de guanábana, promediando cerca del 20%, lo que indico mayor resistencia estructural en residuos como el lulo o guanábana. Por su parte, la hemicelulosa alcanza picos del 57.66% en uva y mínimos del 13.20% en maracuyá, con un promedio alrededor del 30%, predominando en piña y tomate de árbol.

Los componentes "otros" incluyen humedad, fibra cruda, xilano o pH, variando de 3.5% a 67.70%, lo que refleja la diversidad de impurezas y condiciones de procesamiento en cada residuo. Residuos como la cáscara de maracuyá y mandarina, con alto contenido celulósico superior al 65%, resultan ideales para fermentaciones o producción de etanol, mientras que el bagazo de caña de azúcar y pseudotallo de banano ofrecen equilibrios adecuados para degradación microbiana por hongos como *Trichoderma harzianum*.

Por otra parte, en relación al volumen de desechos generados por medio de la industria, según la FAO anualmente se generan 1.3 millones de toneladas de desperdicio de alimentos (FAO, E. 2019), por otra parte una de las frutas que mayor genera residuos es el mango produciendo hasta un (60%), conformadas a partir de cascaras y semillas, así mismo otras variedades de frutas como piña que genera un (40%) de residuos de su contenido total debido a la corona y corazón del mismo (Sagar et al., 2018; Trigo et al., 2019). en relación con lo anterior podemos notar una diferencia significativa debido a que el bagazo de caña presentó una mayor cantidad de desechos generados con un valor de 6.000.000 t/año, superando ampliamente a otros residuos obtenidos los cuales varían de 4,48 t para las semillas de tomate de árbol hasta 38.890 t para fibras de coco.

De este modo estos hallazgos nos permiten saber que el bagazo de caña representa una de las materias primas con mayor generación de desechos agroindustriales para su aprovechamiento, así mismos desechos como cascaras de maracuyá (1754.00 t), cascaras de mandarina (13. 44 t), cascaras de guanábana (18,00t), entre otros representan alternativas complementarias para ser manipuladas en procesos de transformación en regiones donde estos desechos se generen en gran volumen.

Esta matriz subraya la potencialidad de residuos frutales colombianos en aplicaciones agroindustriales sostenibles, los datos de Rojas González (2023) dominan las frutas locales, facilitando análisis contextualizados de la región, de este modo los acompañamientos en conjunto de todos estos residuos juegan un papel fundamental para la degradación de ellos y próximo a ello la obtención de un compost orgánico u otro subproducto lignocelulósico encargado para el desarrollo ambiental con la contribución de microorganismo benéficos.

3.3.2 Objetivo 2: Identificar los factores metabólicos que inciden en la degradación de los residuos de frutas efectuado por *Trichoderma harzianum*, incluyendo el papel de sus enzimas y condiciones óptimas de degradación.

3.3.2.1 Factores que Inciden en la Degradación de los Residuos Frutícola

La tabla 3 presenta un análisis estructurado de los puntos críticos fisicoquímicos y ambientales que se hacen presentes en la degradación de estos residuos, encontramos componentes ambientales como temperatura, el PH y la disponibilidad oxigeno que son factores que no solo condicionan la rapidez con la que se presenta la degradación, puesto que también

determinan la actividad metabólica de los microorganismos encargados de este proceso.

Este análisis permitió identificar la importancia de optimizar procesos en biodegradación, valorización de residuos orgánicos y producción de subproductos de interés agroindustrial.

Tabla 3: *Factores que Inciden en la Degradación de los Residuos Frutícola*

Factor	Descripción	Impacto en la degradación	Referencia bibliográfica
Temperatura	Se encarga de regular el crecimiento de las enzimas como xilasas, lacasas y así mismo células generadas por el *Trichoderma harzianum*.	Temperatura optima del T*richoderma harzianum* es de 25 y 30 **°C**, para un mejor desarrollo contribuyendo de mejor forma en la producción enzimática.	Mulatu et al. (2021). Optimization of culture conditions and production of bio-fungicides from *Trichoderma* sp under solid-state fermentation using mathematical modeling. *Microorganisms*, *9*(8), 1675.
Nivel de potencial hidrógeno (pH)	Este factor es muy importante ya que brinda un mejor recurso de nutrientes al microorganismo y así misma estabilidad de sus enzimas extracelulares.	En un pH de 5.0 y 6.0 se observa que *T. harzianum* muestra mayor actividad y eficiencia, haciendo que sus enzimas se desarrollen de mejor manera el proceso de degradación.	Dhaver et al. (2022). Optimization, purification, and characterization of xylanase production by a newly isolated *Trichoderma harzianum* strain by a two-step statistical experimental design strategy. *Scientific reports*, *12*(1), 17791.
Disponibilidad de Oxígeno	El oxígeno (O_2), es un factor fundamental contribuyendo en la respiración del hongo ya que la degradación se realiza de forma aerobia, generando un mayor desarrollo en las enzimas degradadoras.	Dentro del estudio se evidencio que las temperaturas 30 ◦C, provocan una mayor absorción de O_2, lo que traduce que el hongo consume mayor oxígeno (2,80 L de aire/kg de materia seca·min) y así mismo influye en el aumento de la actividad metabólica.	López-Ramírez et al. (2025). *Trichoderma harzianum* Enzyme Production in Stirred Solid-State Bioreactors as a Strategy for Valorizing Water Hyacinth. In *Waste* (Vol. 3, No. 4, p. 30). MDPI.

Fuente: elaboración propia con base en Mulatu et al. (2021), Dhaver et al. (2022) y López-Ramírez et al. (2025).

En el análisis de la tabla 3 se observó que el poder degradativo del *T. harzianum* se limita fuertemente por una serie de variables como temperatura, nivel de pH y disponibilidad de oxígeno los cuales funcionan como fuente fundamental en el proceso metabólico de este microorganismo en su transcurso degenerativo.

Por otra parte, según reportes encontrados de Mulatu, A., Alemu, T., Megersa, N., & Vetukuri, R. R. (2021), el cual nos resalta la importancia de la temperatura en todo el proceso metabólico que incide en la degradación de residuos de frutas resaltando que este componente es el encargado de regular el crecimiento enzimático (xilasas,lacasas), las cuales como bien se muestra en la matriz requieren de un rango óptimo de temperatura que oscila entre 25 y 30 °C, el cual beneficia de manera significativa la producción enzimática, por lo tanto en este intervalo de temperaturas el trabajo metabólico del hongo aumentara dando lugar a una mayor efectividad en la degradación de residuos frutícolas. De otra manera, es muy importante resaltar que al manejar temperaturas alejadas de este rango se puede presentar una minimización enzimática generando ruptura en el proceso de degradación.

De igual importancia Dhaver, et al. (2022) los resultados obtenidos mediante la matriz de análisis indican que el pH fue uno de los factores que más influyó en el proceso degradativo. Se observó que valores de pH en un rango ácido entre 5,0 y 6,0 favorecieron una mayor actividad enzimática y una mejor eficiencia del proceso, ya que las enzimas producidas por *Trichoderma harzianum* presentaron un mejor desempeño bajo estas condiciones, así mismo sistematiza todo el área estructural y el trabajo de sus enzimas, demostrando la importancia de esta variable debido a que si no se maneja en niveles contralados puede afectar la biotransformación y con ellos

perdida de residuos en conjunto en la obtención del propósito planteado en la búsqueda de un compost orgánico que influya en un cambio ambiental en el desarrollo orgánico.

Por otra parte, en los resultados obtenidos se evidencia que el oxígeno juega un papel fundamental en todo el desarrollo degradativo debido a que contribuye en la respiración aerobia del hongo, puesto que de esta manera ocasiona un aumento en el progreso de las enzimas degradadoras, diferentes estudios señalan que una perfecta aireación es fundamental para generar una actividad microbiana positiva requiriendo tasas de aeración de 0,1 y 0,6 L de aire kg^{-1} en sistemas de compostaje aeróbico. (Ding et al., 2025). Así mismo según hallazgos de López-Ramírez, N. et. (2025), demostró que una mayor aspiración del sistema (2,80 L de aire/kg de materia seca·min), aumenta la actividad metabólica fundamentalmente.

En general, el análisis de estos tres factores demuestra que la mayor capacidad degradativa se alcanza cuando la temperatura se encuentra dentro de su rango óptimo (25–30 °C) y el pH se mantiene en valores ácidos (5,0 y 6,0), que al ser acido contribuyo de muy buena manera en la transformación de los residuos frutícolas, así como la disponibilidad de oxígeno que en conjuntos ayudan a potenciar la capacidad del *Trichoderma harzianum* de desintegrar desechos.

3.3.2.2 Condiciones Metabólicas Óptimas para la Degradación de los Residuos Frutícola

La tabla 4 a continuación presenta estos factores de forma estructurada. Esta matriz reúne las principales condiciones metabólicas que rigen la actividad de *Trichoderma harzianum* en la descomposición de residuos de frutos, teniendo en cuenta variables como temperatura, pH, humedad y oxígeno. Su organización permite relacionar el comportamiento del hongo con su

entorno e identificar escenarios que contribuyen a su eficacia.

Tabla 4: *Condiciones Metabólicas Óptimas de Trichoderma harzianum para la Degradación de los Residuos Frutícola*

Temperatura	PH	Humedad	Disponibilidad de oxigeno	Referencia bibliográfica
Se requiere de una temperatura de 25–30 °C para obtener mayor alcance en crecimiento y generación de enzimas lignocelulolitica.	El proceso enzimático del *T. harzianum* va ligado fuertemente del nivel de pH ya que si este se encuentra en un punto de acidez optimo (5 y 6) las enzimas trabajaran de una mejor manera generando estabilidad y eficiencia catalítica.	Se requiere un porcentaje de humedad de entre 60–75 %, provocando una mayor fermentación y así mismo mayor generación enzimática.	El microorganismo requiere condición de respiración aeróbica, debido a que la disponibilidad de oxígeno contribuye en la producción de enzimas lignoceluloticas tales como las lacasas y xilasas las cuales participan en el proceso oxidativo para la posterior degradación de la lignina presente en los residuos.	Mulatu et al. (2021) Dhaver et al. (2022) Kazeem et al. (2023 López-Ramírez et al. (2025

Fuente: elaboración propia con base en Mulatu et al. (2021); Dhaver et al. (2022); Kazeem et al. (2023); López-Ramírez et al. (2025).

En la tabla presentada es posible observar que el desarrollo de una buena actividad enzimática va ligada a una serie de factores que influyen para que el *Trichoderma harzianum* se desarrolle de buena manera y así poder degradar los residuos frutícolas para la fabricación de un compost orgánico, por lo tanto, se requiere que estos factores como temperatura, pH, humedad y

disponibilidad de oxígeno se encuentren en un punto óptimo para la fácil degradación de desechos en la obtención del compost.

Así mismo como se mencionó anteriormente se requiere de una temperatura media de 25–30 °C para obtener mayor alcance en crecimiento y generación de enzimas lignocelulolitica, de esta misma manera el requerimiento de un pH netamente acido de (5 y 6), de este modo las enzimas trabajaran de una mejor manera generando estabilidad y eficiencia catalítica en la descomposición de la materia orgánica, de igual importancia encontramos la humedad la cual juega un rol único en este proceso debido a que participa en la comunicación directa entre microorganismo y sustrato, necesitando un porcentaje de humedad de 60–75 %, provocando una mayor fermentación y así mismo mayor generación enzimática.

Por otra parte, encontramos la disponibilidad de oxígeno de más o igual de importante de los factores anteriores debido a que para que el hongo pueda realizar su trabajo de forma positiva necesita respiración aerobia llevando a cabo su metabolismo generando enzimas como(xilasas, lacasas) las cuales intervienen en el desarrollo oxidativo para la posterior degradación de la lignina presente en los residuo facilitando la transformación de desechos para la obtención del compost el cual será netamente orgánico obtenido a través de hongos originarios de montaña.

3.3.2.3 Enzimas que Intervienen en la Degradación de Residuos Frutícola

En la tabla 5 se reportan las enzimas fundamentales que ocasionan la degradación de los residuos del área frutícola, así como actividad enzimática, características fundamentales de estas enzimas y las condiciones ideales para que se pueda realizar todo el proceso de degradación de estos residuos, donde las enzimas son la parte fundamental para que este trabajo se pueda

desarrollar de buena manera debido que se encargan de catalizar la desintegración de compuestos difíciles de degradar tales como hemicelulosa, celulosa entre otros.

Tabla 5*: Enzimas que Intervienen en la Degradación de Residuos Frutícola*

Enzima	Actividad enzimática	Condiciones optimas	Comentarios	Referencia
Celulasas	Se presentó una actividad enzimática en su punto más alto de 2,59 y 2,13 U/mL = Unidades enzimáticas por mililitro	Se requiere una producción de sustratos lignocelulósicos con un posterior estado de fermentación de forma sólida.	La celulosa de los restos vegetales se descompone rompiendo los enlaces glicosídicos β-1,4 y liberando azúcares que el hongo utiliza para el metabolismo.	Mukherjee, A. K. (2023). *Trichoderma*: A way for rice health management. *J. Mycopathol. Res*, *61*, 279-285.
Xilanasas	Se evidencia mediante estudios una actividad enzimática de 38.17 U/mL**.**	Según reportes previos, requiere temperaturas cercanas a 70 °C y un pH de alrededor de 5,0.	La acción de las xilanasas es clave, ya que degradan el xilano de la hemicelulosa y facilitan la liberación de azúcares, mejorando el proceso de degradación.	Dhaver et al. (2022). Isolation, screening, preliminary optimisation and characterisation of thermostable xylanase production under submerged fermentation by fungi in Durban, South Africa. *Mycology*, *13*(4), 271-292.
Lacasas	Se aumentó la actividad enzimática de 1.6 a 2.89 U/ml.	Presentó una actividad estable en un nivel de pH de 5-7 con una temperatura de 40-50 °C.	La lacasa se encarga de degradar la lignina permitiendo que las enzimas accedan a los polisacáridos de la biomasa vegetal.	Abd El-latif et al. (2024). Kinetic studies on optimized extracellular laccase from *Trichoderma harzianum* PP389612 and its capabilities for azo dye removal. *Microbial Cel*.

Fuente: elaboración propia con base en Mukherjee (2023); Dhaver et al. (2022); Abd El-Latif et al. (2024)

A partir de la matriz presentada en la Tabla 5, se evidenció la capacidad de *Trichoderma harzianum* en la optimización del compostaje orgánico, debido a su capacidad para producir enzimas lignocelulósicas, entre ellas celulasas, xilanasas y lacasas. Estas enzimas intervienen en la degradación de compuestos presentes en los residuos vegetales, contribuyendo a acelerar la descomposición de la materia orgánica. Por otra parte, la celulasa participa en la degradación de la celulosa presente en los residuos vegetales, realizando un proceso de transformación donde toda la celulosa presente se convierte en azucares simples pasando a ser alimento para otros microorganismos, siendo de esta manera fundamental en la etapa inicial de la generación del compostaje, provocando una alta tasa de microorganismos gracias a la presencia de azucares en el proceso, acelerando la degradación de los residuos orgánicos.

Según lo reportado por Mukherjee (2023), la producción de sustratos lignocelulósicos mediante fermentación en estado sólido requiere condiciones adecuadas que permitan un desarrollo eficiente de la actividad enzimática. En este sentido, el crecimiento y desempeño de las celulasas dependen de factores específicos del proceso, los cuales favorecen la degradación de los compuestos presentes en los residuos orgánicos con una cantidad de 2,59 y 2,13 IU/Ml para un mejor desempeño degradativo; así mismo durante el proceso de degradación la celulosa que se encuentra ubicada en los residuos vegetales se descomponen rompiendo su enlace β-1,4glucosídicos los cuales se encargan de unir la glucosa, liberando azúcares que van hacer manipulados por el hongo durante el proceso.

Por su parte, las xilanasas exhiben una actividad enzimática alta; según Dhaver P, et al. (2022) este factor tiene una influencia significativa en la estabilidad del compost, debido a que facilita la descomposición de estructuras complejas y contribuye a una mayor disponibilidad de

nutrientes durante el proceso. También se ha señalado que las xilanasas alcanzan una mejor actividad bajo condiciones cercanas a 70 °C y un pH aproximado de 5,0, registrándose valores de actividad enzimática de hasta 38,17 U/mL.

En relación con lo anterior, la función de la lacasas es un poco particular debido a que es la encargada de degradar la lignina permitiendo que las enzimas accedan a los polisacáridos de la biomasa vegetal, siendo clave en etapas más avanzadas de la obtención de compostaje por su alta capacidad de resistencia. De esta manera para que el trabajo de esta enzima se pueda generar es requerible la presencia de una serie de condiciones que facilitan el desempeño tales como un nivel de pH de 5-7 con una temperatura de 40-50 °C, así como una actividad enzimática de 1.6 a 2.89 U/ml provocando que estas enzimas se amplíen muy bien en el transcurso de degradar los residuos orgánicos.

3.3.3 Objetivo 3: Analizar la eficiencia degradativa de *Trichoderma harzianum*, según estudios reportados frente a otros microorganismos nativos de montaña en la biotransformación de residuos de frutas de la industria frutícola.

3.3.3.1 Matriz analítica documental

La tabla 6, muestra la comparación de diferentes tipos de microorganismos como el *Trichoderma harzianum* frente a cepas nativas, evaluando de esta manera diferentes variables tales como el porcentaje de degradación, características más importantes y los diferentes tiempos de evaluación, Este enfoque permitió evaluar de una manera más detallada la capacidad degradativa de cada una de las cepas. En este contexto, la matriz utilizada resultó una herramienta fundamental para la recopilación y organización de la información relacionada con la degradación de residuos frutícolas.

Tabla 6*: Matriz analítica documental para el Objetivo 3*

Microorganismo	Residuo frutícola	Porcentaje de degradación (%)	Tiempo de evaluación (días)	Ventajas o características relevantes	Referencia bibliográfica
Trichoderma harzianum	Biomasa lignocelulósica tales como el rastrojo de maíz.	100 % de rendimiento de glucosa y xilosa	4 días tiempo de incubación	Genera producción de un coctel enzimático lignocelulósico en la combinación de varios de esta especie tales como celulasa, celobiohidrolasa y xilosidasas, ayudando en la degradación de residuos orgánicos.	(Zhang et al., 2023; Liu et al., 2024)
Bacillus sp	Biomasa vegetal y residuos del sector vegetal(tomate/melón)	En el porcentaje de degradación la hemicelulosa presento un registro de 43-51% de degradación, así mismo la celulosa con 57% de degradación, seguido de la lignina con 36% bajo condiciones de termófilas (50–70 °C).	El tiempo de estudio se llevó a cabo durante 15 días.	La celulosa y la hemicelulosa presentaron una tasa de degradación por encima a la lignina.	Wang et al. (2024). Effects of inoculation of thermotolerant *Bacillus* strains on lignocellulose degradation. *Agricu lture*, *14*(11), 2044.
Aspergillus níger	Cascaras de mango	No evidencia un porcentaje de degradación del residuo	Tiempo de 112 horas (4,7 días) de fermentación en estado sólido	Genera un cóctel de enzimas hidrolíticas, de celulasas, endoglucanasas y pectinasas, que pueden utilizarse para la sacarificación de la cáscara de mango.	Las-Casas et al. (2024)

Fuente: Fuente: elaboración propia con base en Liu et al. (2024); Zhang et al. (2023); Wang et al. (2024); Las-Casas et al. (2024).

Por medio de esta matriz se contrastaron las capacidades degradativas reportadas para el *T. harzianum*, el *aspergillus niger y Bacillus sp* a la hora de desintegrar residuos del sector frutícola, donde pudimos observar la capacidad que tiene el *Trichoderma harzianum* ya que presenta diferencias significativas en gran parte de los puntos evaluados.

Para dar inicio es muy importante mencionar que el *Trichoderma harzianum* en este estudio encontrado por Liu et al., (2024); Zhang et al., (2023) trabajo con la Biomasa lignocelulósica del rastrojo de maíz la cual presentó un 100 % de rendimiento de glucosa y xilosa en un periodo corto de 4 días. Esta conducta se debe a que genera producción de un coctel enzimático lignocelulósico en la combinación de varios de esta especie tales como celulasa, celobiodrilasay xilosidasas, los cuales contribuyen en la desintegración de residuos, sin embargo, las diferencias evidenciadas en los diferentes tiempos de evaluación no solo se deben a la capacidad enzimática que posee en *T. harzianum,* sino también a la naturaleza del sustrato utilizado. Según ovy et al. (2019), las particularidades estructurales del residuo y su composición fisicoquímica intercede con el tiempo de descomposición debido a que determinan el grado de disponibilidad del microorganismo y enzimas.

En este sentido ayudando en la degradación de residuos orgánicos, ocasionando de este modo la descomposición de materia orgánica lo cual evidencio el posicionamiento que tiene este microorganismo en la disputa de generar compostaje en un estado corto de tiempo. De esta manera podemos observar que la biomasa de rastrojo de maíz cuenta con una estructura lignocelulósica más fácil y con un contenido de compuestos, a diferencia de otros residuos como las cascaras de frutas que presenta una alta tasa lignocelulósica, así como sustancias provenientes de este mismo material como aceites, azucares incorporados en el interior de materiales haciendo que la velocidad

de degradación sea más compleja e la obtención del compostaje.

Por otro lado, se estudió al *Bacillus sp* con una Biomasa vegetal y residuos del sector vegetal(tomate/melón), el cual Wang, X., et al. (2024) manifestó una eficiencia estable ya que cuenta con un porcentaje de degradación, donde la hemicelulosa presento un registro de 43-51% de degradación, así mismo la celulosa con 57%, seguido de la lignina con 36%, destacando su tiempo de evaluación de 15 días esto demuestro que el *Trichoderma harzianum* tiene ventaja a esta clase de bacterias por tener un gran alcance en tan poco tiempo.

En relación con lo anterior en el *aspergillus niger* se evaluó la cascara de frutas de mango según Las casas et al. (2024) por medio de la matriz se observó que tiene la capacidad de producir enzimas capaces de actuar sobre residuos vegetales generando un cóctel de enzimas hidrolíticas, de celulasas, endoglucanasas y pectinasas, que pueden utilizarse para la sacarificación de la cáscara de mango, con un tiempo de de 112 horas, no siendo factible su implementación debido a que en la investigación no evidencia su capacidad de degradación.

4. CONCLUSIONES

La categorización de los residuos del sector frutícola permitió determinar que los residuos de frutas como las cascaras, bagazo y restos de pulpa corresponden a los subproductos de mayor volumen de desechos en los procesos de procesamiento de frutas, simbolizando un recurso fundamental para su aprovechamiento en la transformación en compostaje. de ese modo se evidencio que el bagazo de caña de azúcar presento el mayor porcentaje de residuos, con aproximadamente 6.000.000 t/año, así mismo otros residuos como las cascaras de maracuyá demostraron valores de 1.754 t, así como la cascara de coco con unas cifras de 38.890 t, y las cascaras de mango con 480,45 t. El estudio de las características fisicoquímicas demostró que los residuos están formados mediante compuesto como celulosa, hemicelulosa y lignina que intervienen puntualmente en su capacidad de degradación. Por otro lado, se examinó que las cascaras de maracuyá es el residuo el cual presenta un mayor contenido de celulosa (75,10 %), seguidamente de los residuos de cascaras de mandarina (67,77 %), de este modo también se resalta que la cascara de uva presento el mayor registro de presencia de hemicelulosa (57,66 %), así como la cascara de guanábana la cual fue la que mostró un mayor contenido de lignina (34.88 %). Además, se estableció que la velocidad de biodegradación cambia según la estructura de la biomasa, resultando más rápida en residuos con menos contenido de compuestos con complejidad estructural y de menos velocidad es residuos con un alto porcentaje de sustrato lignocelulósico.

La investigación permitió determinar qué componentes fisicoquímicos tales como pH, temperatura, humedad y disponibilidad de oxígeno intervienen radicalmente en el metabolismo del *Trichoderma harzianum* y en su potencial para desintegrar materiales orgánicos. Así mismo se observó que estas condiciones regulan el desarrolló del microorganismo, el crecimiento de la biomasa y la acción de mecanismos metabólicos encargados de la biodegradación del material orgánico, donde se requiere un rango óptimo de temperatura que oscila de 25 y 30 °C, el cual beneficia de manera significativa la producción enzimática, del mismo modo que el pH en un rango ácido entre 5,0 y 6,0 favorece una mayor actividad enzimática y una mejor eficiencia del proceso, también es muy importante para el proceso la presencia de tasas de aeración de 0,1 y 0,6 L de aire kg^{-1} en sistemas de compostaje aeróbico así como tener una mayor aspiración del sistema (2,80 L de aire/kg de materia seca·min), aumenta la actividad metabólica fundamentalmente. A partir de la literatura se evidencio que el uso de condiciones ideales el *Trichoderma harzianum* aumenta la generación de enzimas extracelulares entre las que destacan las celulasas, hemicelulasas y enzimas ligninolíticas que intervienen en la descomposición de compuestos resistentes localizados en residuos lignocelulósicos donde el crecimiento y desempeño de las celulasas dependen de condiciones específicas en el proceso, los cuales son fundamental en la degradación de los compuestos presentes en los residuos orgánicos con una cantidad de 2,59 y 2,13 IU/Ml para un mejor desempeño degradativo. En consecuencia, este proceso genera una mayor eficiencia en la transformación de compuestos orgánicos, impulsando las actividades de biodegradación y favoreciendo al aprovechamiento de la biomasa frutícola en la elaboración de compost orgánico.

El estudio realizado nos permitió demostrar que el *Trichoderma harzianum* posee características favorables para la degradación de residuos lignocelulósicos al presentar resultados notables en el proceso de biotransformación, donde el *Trichoderma harzianum* trabajo con la biomasa lignocelulósica del rastrojo de maíz la cual presentó un 100% en el proceso de obtención de glucosa y xilosa resaltando la capacidad de degradación en un periodo corto de 4 días. De este modo a través de este proceso se genera producción de un coctel enzimático lignocelulósico en la combinación de varios de esta especie tales como celulasa, celobiodrilasa y xilosidasas, los cuales contribuyen en la desintegración de residuos.

Esta capacidad se debe principalmente a su proceso de desarrollo, capacidad de adaptación al espacio, colonización de diferentes sustratos, y producción de una alta gama de enzimas degradativas para descomposición de compuestos lignocelulósicos. Por otro lado, el *Bacillus sp* presento una eficiencia estable ya que cuenta con un porcentaje de degradación, donde la hemicelulosa presento características de 43-51% de degradación, así mismo la celulosa con 57%, seguido de la lignina con 36%, destacando su tiempo de evaluación de 15 días en el trabajo con la biomasa vegetal y residuos del sector vegetal(tomate/melón). De este mismo modo el *aspergillus niger* se evaluó por medio de residuos de origen frutícola, lo que demuestra su capacidad de producir enzimas hidrolíticas.

En general, los resultados encontrados muestran que *Trichoderma harzianum* tiene buenas posibilidades para ser utilizado en la transformación de residuos lignocelulósicos del sector agroindustrial. Sin embargo, no es posible afirmar que sea más efectivo que los demás microorganismos, ya que los estudios revisados fueron realizados bajo condiciones y tiempos de evaluación diferentes. Por ello, sería necesario realizar estudios experimentales en condiciones controladas que permitan comprobar su comportamiento y determinar qué tan viable puede ser

su uso en la producción de compost orgánico.

5. BIBLIOGRAFIA

Argumedo-Delira , R., Alarcón, A., Ferrera–Cerrato, R., & Peña–Cabriales, J. (2009). El género

fúngico *Trichoderma* y su relación con los contaminantes orgánicos e inorgánicos. *Revista internacional de contaminación ambiental, 25*(4), 257-269. Obtenido de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37012013006

Siada, O. A. A., Negm, M. S., Basiouny, M. E., Fouad, M. A., & Elagroudy, S. (2018). Protein enrichment of agro–industrial waste by *trichoderma harzianum* EMCC 540 through solid state fermentation for use as animal feed. *J. Geogr. Environ. Earth Sci. Int*, *13*(4), 1-12.

Aguiar, S., Estrella, M. E., & Cabadiana, H. U. (2022). Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. *Axioma*, (27), 5-11.

Alcántara-Revilla, A. R., Mejía-Benavides, A., Chávez-García, S. C., & Castillo-Llerena, D. E. (2022). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su impacto en el medio ambiente. *Revista Científica OGOLL*, *2*(2), e29.

Amaya Lema, J. N., & Mejía Pérez, A. B. (2021). *Evaluación de la capacidad degradadora de Trichoderma sp. y Aspergillus sp. en bagazo de caña de azúcar [Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo].* Repositorio Institucional. Obtenido de http://dspace.unach.edu.ec/handle/5100/838

Food and Agriculture Organization (FAO). The State of Food and Agriculture 2019. Moving Forward on Food Loss and Waste Reduction. 2019. Available online: http://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf (accessed on 9 May 2021).

Sagar, N.A.; Pareek, S.; Sharma, S.; Yahia, E.M.; Lobo, M.G. Residuos de frutas y verduras: compuestos bioactivos, su extracción y posible utilización. El Compr. Rev. Comida Sci. Saf de comida. 2018, 17, 512–531 Trigo, J.P.; Alexandre, E.M.C.; Saraiva, J.A.; Pintado, M.E. Compuestos de alto valor agregado de subproductos de frutas y verduras:

caracterización, bioactividades y aplicación en el desarrollo de nuevos productos alimenticios. Crit. Rev. Comida Sci. Nutr. 2019.

Narvaez, A. J. B., García, A. V., Rodríguez, I., & Muñoz, J. E. (2024). El potencial de los compuestos bioactivos de residuos de frutas y verduras en la industria alimentaria: Una revisión. *Revista de Ciencias*, *27*(2), e20214046-e20214046.

Alara, O. R., Abdurahman, N. H., & Ukaegbu, C. I. (2021). Extraction of phenolic compounds: A review. *Current research in food science*, *4*, 200-214.

Pagano, I., Campone, L., Celano, R., Piccinelli, A. L., & Rastrelli, L. (2021). Green non-conventional techniques for the extraction of polyphenols from agricultural food by-products: A review. *Journal of Chromatography A*, *1651*, 462295.

Cortés-Hernández, F. D. C., Alvarado-Castillo, G., & Sánchez-Viveros, G. (2023). Trichoderma spp., una alternativa para la agricultura sostenible: una revisión. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *25*(2), 73-87.

Díaz Vela, J., Contreras Romero, B., Mirón Cortes, M. F., Vázquez Rodríguez, A., Martínez Martínez, N., Sánchez Hernández, J. L., & López-Escobar, L. A. (2024). Revalorización de residuos agroindustriales para la reproducción de esporas de *Trichoderma spp.* en sistemas a pequeña escala. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, 7*(1), 621-632.

FAO. (2015). *Abono Orgánico Compost*. Obtenido de FAO.org: https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/1133254/https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/1133254/

FAO. (2024). *Estadísticas de producción agrícola 2010-2023*. Recuperado el 2025, de

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd3755en

Función Pública. (2005). *Decreto 4741 de 2005*. Obtenido de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18718

Función Pública. (2015). *Ley 1753 de 2015*. Obtenido de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=61933

Gobierno de España. (2023). *¿Qué es la economía circular?* Recuperado el 2025, de Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia Gobierno de España: https://planderecuperacion.gob.es/noticias/que-es-la-economia-circular-prtr#:~:text=La%20econom%C3%ADa%20circular%20es%20un%20modelo%20centrado%20en%20maximizar%20los,generaci%C3%B3n%20no%20se%20pueda%20evitar.

Gomez Castro, F. I., González-Guerra, G. M., Restrepo-Elorza, M., Montiel-Carrillo, A. P., Álvarez-Rivera, K. Y., Linares-Luna, R. G., & Hernández, S. (2022). Residuos de frutas y vegetales como materias primas para la producción de biocombustibles: potencial en el estado de Guanajuato. *Digital Ciencia@UAQRO, 15*(1), 8-19. Obtenido de https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/697

Grijalva, P., Cornejo, G., Goméz, R., Real, K., & Fernandez , A. (2019). Herramientas colaborativas para revisiones sistemáticas. *Espacios, 40*(25), 9. Obtenido de https://www.revistaespacios.com/a19v40n25/19402509.html#uno

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6 ed.). Dialnet. Obtenido de https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008

Hernández-Fernández, J., Pérez, E. E., & Piñeros-Castro, Y. (2018). Identificación y evaluación de actividad celulolítica en aislamientos nativos de Trichoderma spp obtenidos de biomasa de palma de aceite. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *20*(1), 59-67.

Hernández-Melchor, D. J., Ferrera-Cerrato, R., & Alarcón, A. (2019). *Trichoderma:* Importancia agrícola, biotecnológica, y sistemas de fermentación para producir biomasa y enzimas de interés industrial. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences, 35*(1), 98-112. Obtenido de https://revistas.udec.cl/index.php/chjaas/article/view/993

Raclavská, H., Růžičková, J., Juchelková, D., Šafář, M., Brťková, H., & Slamová, K. (2021). The quality of composts prepared in automatic composters from fruit waste generated by the production of beverages. *Bioresource Technology*, *341*, 125878.

Barrena, R., Font, X., Gabarrell, X., & Sánchez, A. (2014). Home composting versus industrial composting: Influence of composting system on compost quality with focus on compost stability. *Waste Management*, *34*(7), 1109-1116.

Dos Santos, A. C., Ximenes, E., Kim, Y., & Ladisch, M. R. (2019). Lignin–enzyme interactions in the hydrolysis of lignocellulosic biomass. *Trends in biotechnology*, *37*(5), 518-531.

Kumar, A., & Chandra, R. (2020). Ligninolytic enzymes and its mechanisms for degradation of lignocellulosic waste in environment. *Heliyon*, *6*(2).

Jiménez Páez, E., lonso-Fariñas, B., Trujillo Reyes, Á., & Universidad de Sevilla, D. (2021). *Análisis de ciclo de vida comparativo entre la deposición en vertedero y el tratamiento*

biológico mediante digestión anaerobia de residuos de frutas y verduras generados en mercados abiertos. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: https://agris.fao.org/search/en/providers/125077/records/6765398350e69ae818389469

Méndez-Matías, A., Robles, C., Ruiz-Vega, J., & Castañeda-Hidalgo, E. (2018). Compostaje de residuos agroindustriales inoculados con hongos lignocelulósicos y modificación de la relación C/N. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *9*(2), 271-280.

Minambiente. (2022). *interesado en ayudar a disminuir el desperdicio de alimentos*. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/minambiente-interesado-en-ayudar-a-disminuir-el-desperdicio-de-alimentos/#:~:text=Seg%C3%BAn%20el%20Departamento%20Nacional%20de,responsable%20de%20la%20p%C3%A9rdida%20de

Moreno , T., & De La Ascensión, R. (2024). *Efecto de desechos agroindustriales utilizados como sustratos en la producción de esporas de Trichoderma harzianum por fermentación en sustrato sólido [Tesis de maestria, Universidad Nacional de Trujillo.* Respositorio Institucional. Obtenido de https://hdl.handle.net/20.500.14414/22161

Naciones Unidas . (2023). *Objetivos de Desarrolllo sostenible* . Obtenido de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/

Panda, S. K., Mishra, S. S., Kayitesi, E., & Ray, R. C. (2016). Microbial-processing of fruit and vegetable wastes for production of vital enzymes and organic acids: Biotechnology and scopes. *Environmental research*, *146*, 161-172.

Cueva-Orjuela, J. C., Hormaza-Anaguano, A., & Merino-Restrepo, A. (2017). Sugarcane

bagasse and its potential use for the textile effluent treatment. Dyna, 84(203), 291-297.

Vargas Isaza, C. A., Urrego Yepes, W., Arbeláez Vergara, M. Y., & Sánchez Manosalba, C. J. (2019). Comportamiento fisicoquímico de compuestos de caucho natural al adicionar residuos agroindustriales como cargas reforzantes. Revista EIA, 16(32).

Gomez, T. S., Zuluaga Palacio, S., Salazár Marín, M. C., Peñuela, A. F., & Fernández Morales, P. (2020). Comportamiento mecánico de fibras y no tejidos de coco. Comparación entre parámetros de punzonado y adhesión química. Avances Investigación en Ingeniería, 17(1).

Egresada, W. E. P. H., & Serrano, C. A. M. (2021). El papel de los residuos agrícolas en la extracción de nanocristales de celulosa.

Rojas González, A. F. (2023). *Caracterización física y química de residuos de frutas: cáscaras y semillas.* Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/846

Castañeda-Niño, J. P., Mina Hernandez, J. H., & Solanilla Duque, J. F. (2024). Potential of Plantain Pseudostems (Musa AAB Simmonds) for Developing Biobased Composite Materials. Polymers, 16(10), 1357.

Romero-Arenas, O., Huerta Lara, M., Damián Huato, M. A., Domínguez Hernández, F., &

Arellano Victoria, D. A. (2009). Características de *Trichoderma harzianum,* como agente limitante en el cultivo de hongos comestibles. *Revista Colombiana de Biotecnología, 11*(2), 143-151. Obtenido de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77613172015

Romero-Sáez, M. (2022). Los residuos agroindustriales, una oportunidad para la economía circular. *TecnoLógicas*, *25*(54).

Singh, S., & Nain, L. (2014, June). Microorganisms in the conversion of agricultural wastes to compost. In *Proc Indian Natn Sci Acad* (Vol. 80, No. 2, pp. 473-481).

Suresh, V., Shams, R., Dash, K. K., Shaikh, A. M., & Béla, K. (2025). Comprehensive review on enzymatic polymer degradation: A sustainable solution for plastics. *Journal of Agriculture and Food Research*, *20*, 101788.

Toloza Sandoval, S. D. (2023). *Caracterización enzimática de bacterias aisladas de un compostaje doméstico con potencial aplicación en el aprovechamiento de residuos orgánicos [Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander.* Repositorio Institucional. Obtenido de https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/15200

Corredor, Y. A. V., & Pérez, L. I. P. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, *14*(1), 59-72.

William Giovanni , C. O. (2014). Tratamientos aplicables a materiales lignocelulósicos para la obtención de etanol y productos químicos. *Revista de Tecnología, 13*(1), 39-44. Obtenido de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6041572

Zhang, Y., Wang, R., Liu, L., Wang, E., Yang, J., & Yuan, H. (2023). Distinct lignocellulolytic enzymes produced by Trichoderma harzianum in response to different pretreated substrates. *Bioresource Technology*, *378*, 128990.

Mulatu, A., Alemu, T., Megersa, N., & Vetukuri, R. R. (2021). Optimization of culture conditions and production of bio-fungicides from *Trichoderma* species under solid-st ate fermentation using mathematical modeling. *Microorganisms*, *9*(8), 1675.

Dhaver, P., Pletschke, B., Sithole, B., & Govinden, R. (2022). Optimization, purification, and characterization of xylanase production by a newly isolated *Trichoderma harzianum* strain by a two-step statistical experimental design strategy. *Scientific reports*, *12*(1), 17791.

Kazeem, M. O., Mhii, U., Arekemase, M. O., Tiamiyu, A. O., & Maiangwa, J. (2023). Response surface optimization of xylanase diminutive cellulase by a thermo-alkaline tolerant *Trichoderma harzanium* FC50 under solid state cultivation on Delonix regia pods. *Journal of Taibah University for Science*, *17*(1), 2221824.

López-Ramírez, N., Favela-Torres, E., Volke-Sepúlveda, T., & Méndez-González, F. (2025, September*). Trichoderma harzianum* Enzyme Production in Stirred Solid-State Bioreactors as a Strategy for Valorizing Water Hyacinth. In *Waste* (Vol. 3, No. 4, p. 30). MDP

Ding, S., Du, S., Zhang, K., Wu, Y., Xu, X., Lou, L., & Wu, D. (2025). Intelligent aeration strategy for optimizing food waste composting and enhancing humification. Chemical

Engineering Journal, 521, 166668

Mukherjee, A. K. (2023). *Trichoderma*: A way for rice health management. *J. Mycopathol. Res*, *61*, 279-285.

Dhaver P, Pletschke B, Sithole B, Govinden R. Isolation, screening, preliminary optimisation and characterisation of thermostable xylanase production under submerged fermentation by fungi in Durban, South Africa.

Abd El-latif, A. S., Zohri, A. N. A., El-Aref, H. M., & Mahmoud, G. A. E. (2024). Kinetic studies on optimized extracellular laccase from Trichoderma harzianum PP389612 and its capabilities for azo dye removal. *Microbial Cell Factories*, *23*(1), 150.

Liu, Y., Li, T., Zhu, H., Cao, L., Liang, L., Liu, D., & Shen, Q. (2024). Methionine inducing carbohydrate esterase secretion of *Trichoderma harzianum* enhances the accessibility of substrate glycosidic bonds. *Microbial Cell Factories*, *23*(1), 120.

Zhang, Y., Wang, R., Liu, L., Wang, E., Yang, J., & Yuan, H. (2023). Distinct lignocellulolytic enzymes produced by *Trichoderma harzianum* in response to different pretreated substrates. *Bioresource Technology*, *378*, 128990.

Novy, V., Nielsen, F., Seiboth, B., & Nidetzky, B. (2019). The influence of feedstock

characteristics on enzyme production in Trichoderma reesei: a review on productivity, gene regulation and secretion profiles. *Biotechnology for biofuels*, *12*(1), 238.

Wang, X., Gao, J., Ning, G., Zhang, H., Duan, Y., Li, J., ... & Yang, Z. (2024). Effects of inoculation of thermotolerant Bacillus strains on lignocellulose degradation. *Agriculture*, *14*(11), 2044.

Yupanqui-Mendoza, S. L., Sanchez-Moncada, B. J., Las-Casas, B., & Castro-Alvarado, A. P. (2024). Simple one-step treatment for saccharification of mango peels using an optimized enzyme cocktail of Aspergillus niger ATCC 9642. *Brazilian Journal of Microbiology*, *55*(2), 1151-1166.