



**Somos calidad,
somos USC**

Hongos de Podredumbre blanca en la remoción de colorantes textiles: una revisión sistemática.

**Autor
Valentina Pungo Palencia**

**Título por el que opta
Microbióloga**

**Director
Julián Alonso Rojas Barreto**

**Grupo de Investigación
GIMIA Grupo de Investigación en Microbiología, Industria y Ambiente.**

**Línea de Investigación
Microbiología Ambiental**

**Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Microbiología
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2025**

IMPACTOS

Relacione el (los) impacto(s) que presentó el Trabajo de Grado según los siguientes criterios:

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico		
Responsabilidad social		
Científico		
Indicadores de Gestión		
Tecnológico		
Técnico		
Ambiental	Trabajo de grado	Comunidades que acceden a tratamiento de aguas
Social		
Cultural		

HONGOS DE PODREDUMBRE BLANCA EN LA REMOCIÓN DE COLORANTES TEXTILES: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

Valentina Pungo Palencia¹ (valentina.pungo00@usc.edu.co)

¹Grupo de Investigación en Microbiología, Industria y Ambiente (GIMIA), Programa de Microbiología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

La presencia de colorantes textiles en los efluentes industriales se ha constituido en un problema ambiental relevante, debido a su alta toxicidad, estabilidad química y resistencia a los sistemas de tratamiento convencionales. Para ello, se desarrolló una revisión sistemática que aborda las investigaciones recientes la actividad enzimática de diferentes especies de hongos de podredumbre blanca con el fin de evaluar su eficacia como alternativa biotecnológica para la biodegradación de colorantes en aguas residuales.

Los resultados evidencian que la especie *Trametes versicolor* se destaca por sus altos porcentajes de biodegradación alcanzando hasta un promedio de 89,90% de diferentes colorantes industriales, debido principalmente a su sistema ligninolítico. Este último contempla las enzimas lignina peroxidasa (LiP) y la manganoso peroxidasa (MnP) mostrando porcentajes del 89,55%, mientras que las lacasas reportaron una frecuencia del 89,95%. Estos valores evidenciaron la capacidad del hongo para transformar compuestos complejos y persistentes presentes en los efluentes textiles.

Los hongos de podredumbre blanca representan una alternativa biotecnológica valiosa para la biorremediación de aguas residuales contaminadas con colorantes, resaltándose la importancia de continuar su estudio desde el enfoque enzimático como una estrategia sostenible aplicable en ciencias ambientales, microbiología y biotecnología industrial.

Palabras clave: Biodegradación, Colorantes, Enzimas, Hongos de podredumbre blanca

WHITE ROT FUNGI IN TEXTILE DYE REMOVAL: A SYSTEMATIC REVIEW.

ABSTRACT

The presence of textile dyes in industrial effluents has become a significant environmental problem due to their high toxicity, chemical stability, and resistance to conventional treatment systems. To this end, a systematic review was conducted that addresses recent research on the enzymatic activity of different species of white rot fungi to evaluate their effectiveness as a biotechnological alternative for the biodegradation of dyes in wastewater.

The results show that the *Trametes versicolor* species stands out for its high biodegradation rates, reaching an average of 89.90% of different industrial dyes, mainly due to its ligninolytic system. The latter includes the enzymes lignin peroxidase (LiP) and manganese peroxidase (MnP), showing percentages of 89.55%, while laccases reported a frequency of 89.95%. These values demonstrated the fungus' ability to transform complex and persistent compounds present in textile effluents. White rot fungi represent a valuable biotechnological alternative for the bioremediation of dye-contaminated wastewater, highlighting the importance of continuing their study from an enzymatic perspective as a sustainable strategy applicable to environmental sciences, microbiology, and industrial biotechnology.

Keywords: Biodegradation, Dyes, Enzymes, White Rot Fungi

HIGHLIGHTS

- A partir del análisis realizado, se evidenció que las enzimas lacasa, manganeso peroxidasa y lignina peroxidasa son las más empleadas en los estudios de biodegradación de colorantes industriales. Entre ellas, la lacasa se destacó por su gran capacidad para oxidar diferentes compuestos aromáticos, lo que la convierte en una de las enzimas más versátiles y efectivas dentro de los procesos de biorremediación.
- Un aspecto relevante fue la estabilidad de *Trametes versicolor* frente a diferentes condiciones ambientales, manteniendo una actividad enzimática constante en un amplio rango de pH (4–7) y temperaturas moderadas (25–37 °C). Estas características la posicionan como una especie con gran potencial para ser aplicada en procesos de biorremediación tanto a nivel de laboratorio como en sistemas a escala piloto.
- Aunque otras especies como *Pleurotus ostreatus* y *Phanerochaete chrysosporium* también han mostrado resultados favorables, *Trametes versicolor* se consolida como una de las más eficientes por su alta producción enzimática y su capacidad de adaptarse a distintos tipos de colorantes.
- En general, los resultados comprueban que la biorremediación con hongos ligninolíticos representa una alternativa sostenible y efectiva para el tratamiento de efluentes textiles, contribuyendo al desarrollo de tecnologías limpias y a la recuperación de ecosistemas acuáticos impactados por la contaminación industrial.

1. INTRODUCCIÓN

Los colorantes son compuestos químicos sintetizados o también obtenidos de la naturaleza que pueden absorber en el espectro de luz visible entre los 400 y 700 nm. Los colorantes logran absorber por la presencia en su estructura química de grupos conocidos como cromóforos donde se unen los átomos que absorben la luz en y también aparecen heteroátomos como nitrógeno, oxígeno y azufre. Del mismo modo que el grupo cromóforo también existen grupos de átomos denominados auxocromos, que permiten el fijado del colorante en el sustrato y modificar el tono del mismo. (Esteban et al., 2018) Algunos ejemplos de estos grupos son las aminas, los grupos hidroxilo y los grupos sulfonato. La unión de los colorantes se produce por la formación de soluciones, enlaces covalentes, vía adsorción, retención mecánica o bien formación de complejos con sales o metales. (Deng et al., 2024)

Los colorantes pueden clasificarse en dos grandes grupos: colorantes naturales y colorantes sintéticos. Los primeros son aquellos que se pueden encontrar en materiales que han sido utilizados por el hombre desde tiempos muy antiguos. Su obtención posee como fuente materia de origen animal o insecto, vegetal o mineral, por lo tanto son componentes que se clasifican como orgánicos e inorgánicos. (Costa et al., 2025)

Según su estructura química, los colorantes naturales se distribuyen en diferentes grupos entre los que se encuentran los índigoides (color azul, como el índigo que se extrae de los moluscos), las piridinas (de color amarillo, como la berberina), el grupo de los carotenoides (los cuales se extraen de las plantas, particularmente de la zanahoria y la calabaza, los cuales son ampliamente utilizados en la industria alimenticia), los quinonoides (con coloración que va del amarillo al rojo, los cuales poseen origen en las plantas con flores), los flavonoides (siendo los colores que les son propios el amarillo y rojo, pero también el azul o el naranja), los dihidropirano, las betalainas (químicamente muy bien materializadas y utilizadas en la industria alimenticia y farmacéutica) y los taninos. (Costa et al., 2025)

Los colorantes se utilizan en la industria textil, alimentaria y farmacéutica de manera extensiva. Desde la segunda mitad del siglo XIX, los colorantes sintéticos han venido sustituyendo a los naturales debido a su inmediatez, su facilidad de aplicación y a su bajo coste, lo que ha permitido su producción y su uso a gran escala.

Los colorantes sintéticos muestran una fuerte persistencia en el medio ambiente debido a que están diseñados para ser resistentes a procesos físicos y químicos como puede ser la luz solar, el lavado, el sudor, los agentes oxidantes o el ataque microbiano. En este sentido, los contaminantes de tipo recalcitrante corresponden a compuestos con las características descritas anteriormente, contribuyendo a su acumulación en los ecosistemas acuáticos y terrestres, es de resaltar que también hay ciertos tipos de colorantes como son los tintes metalizados que provocan la introducción de elementos pesados como cromo, níquel, cobre, cobalto los cuales agravan los efectos tóxicos de estos efluentes. (Herath et al., 2024)

La industria textil es la principal consumidora de colorantes sintéticos, siendo la responsable de la producción y la liberación masiva de estos compuestos en el medio ambiente. Existen más de 100.000 colorantes comerciales registrados y se estima que la producción de colorantes sintéticos supera las 700.000 toneladas al año. Sin embargo, debido a la baja eficiencia del proceso de fijación que ocurre durante el proceso de teñido (donde se evidencia que un 10-15% del colorante se adhiere de forma irreversible a las fibras), se han contabilizado alrededor de 280.000 toneladas de estos compuestos que anualmente son descargadas como residuos a cuerpos de agua. (*Contaminación Generada Por Colorantes de La Industria Textil*, n.d.) Este fenómeno se encuentra presente no sólo en los países desarrollados, sino en las economías emergentes como es el caso de India, que se considera una referencia no sólo a nivel mundial a razón de su carga de vertidos, ya que la industria textil descarga hacia el medio ambiente un orden de 280.000 toneladas anualmente, materializando el 54% de los residuos correspondientes a colorantes que desechan los métodos de producción. Finalmente, los residuos contaminantes llegan a los recursos hídricos, y a partir de ahí afectan negativamente a la flora, a la fauna acuática y, a los seres humanos. (Costa et al., 2025)

Por otro lado, los efluentes textiles son utilizados también para el riego agrícola siendo una práctica adoptada en muchas regiones, especialmente entre los países donde escasean los recursos hídricos. Esta práctica reduce la tasa de germinación, hace descender el desarrollo de la biomasa vegetal y provoca un aumento de la habitabilidad

de las plantas para los patógenos. A más largo plazo, se produce una degradación de la fertilidad del suelo causada por la acumulación de los compuestos tóxicos y de metales pesados.(Mendoza-Retana et al., 2021)

En la actualidad existen diversos métodos como físicos, químicos y biológicos para el tratamiento de estos efluentes coloreados. Dentro de los físicos incluyen la adsorción, filtros de membranas, la coagulación/floculación, el intercambio iónico y la radiación. Los métodos químicos contemplan la aplicación de reactivos y tratamientos químicos para eliminar los colorantes como la ozonización, el reactivo de Fenton, la oxidación fotoquímica, el hipoclorito sódico y el electroquímico.(Mutegoa, 2024) Sin embargo, estos métodos fisicoquímicos presentan muchas desventajas y limitaciones tales como sus altos costos además de contaminación secundaria.

A diferencia de los anteriores, los métodos biológicos presentan ventajas para la eliminación de colorantes, como son su bajo consumo de insumos, costes reducidos, mantenimiento la sostenibilidad ambiental y mayor eficiencia.(He et al., 2018)

Los hongos son organismos eucariotas multicelulares, se han convertido en un medio altamente eficaz en la biorremediación debido a su potencial para transformar o degradar compuestos contaminantes mediante metabolitos derivados de rutas metabólicas. La remediación de compuestos orgánicos tóxicos facilitada por hongos, constituye una metodología de biorremediación medioambiental que es ecológicamente viable y eficiente para la recuperación de ambientes contaminados. (Adebayo et al., 2021) Se han empleado diversos grupos de hongos, incluyendo hongos marinos, extremófilos, y, en particular, los hongos de la pudrición blanca.

Los hongos de podredumbre blanca, son organismos filamentosos que pertenecen en su mayor parte al filo *Basidiomycota* y que se encuentran ampliamente distribuidos en ecosistemas naturales. Asimismo, son capaces de degradar la madera, es decir, son capaces de actuar sobre los principales polímeros vegetales, como la celulosa, la hemicelulosa y, especialmente la lignina. Géneros como *Pleurotus*, *Phanerochaete*, *Trametes*, *Ganoderma* y *Lentinus* son algunos de los más explorados por sus potencialidades ligninolíticas. Entre ellos, *Phanerochaete chrysosporium* ha sido ampliamente investigado y se ha considerado como organismo modelo en estudios sobre la biodegradación de lignina, dada la efectividad de su sistema enzimático extracelular. (Himanshu et al., 2025)

La capacidad de estos hongos para degradar la lignina se basa en la producción de enzimas extracelulares oxidativas tales como la lignina peroxidasa (LiP), la manganeso peroxidasa (MnP) y la lacasa. La producción de estas tres enzimas se caracteriza por una escasa especificidad y un alto poder oxidativo que permite la transformación de una amplia gama de compuestos recalcitrantes, incluidos los colorantes sintéticos, que se utilizan en la industria textil. La especificidad de estas enzimas se debe a que presentan mecanismos de oxidación no químicos rompiendo los enlaces químicos presentes en estas estructuras complejas, transformando al mismo tiempo los colorantes en compuestos menos tóxicos y asimilables por el medio ambiente. (Kijpornyongpan et al., 2022)

Además del proceso enzimático, el micelio de estos hongos posee una red densa de hifas que actúan como un biosorbente natural, permitiendo la adsorción de colorantes presentes en aguas residuales. Esta estructura otorga una gran superficie específica, favoreciendo la retención física y química de contaminantes, lo que contribuye significativamente a su eliminación del medio acuático. La combinación de biodegradación enzimática y bioadsorción convierte a estos hongos en instrumentos prometedores para el tratamiento de efluentes textiles.(Bautista-Zamudio et al., 2023)

1.1 Objetivo general

Se llevó a cabo una revisión sistemática de las estrategias empleadas sistemática sobre las estrategias de biodegradación de colorantes disueltos en aguas con hongos de podredumbre blanca, con el fin de recopilar y analizar los avances reportados en esta línea de investigación

2. METODOLOGÍA

2.1. Búsqueda bibliográfica.

Se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica utilizando dos tipos de bases de datos (multidisciplinarias y especializadas), así como palabras claves en español e inglés (**Tabla 1**). Se emplearon diversas combinaciones de las palabras claves con el uso de operadores booleanos para obtener una gran cantidad de publicaciones. Para la selección de las publicaciones a analizar se definieron criterios de inclusión y exclusión (**Figura 1**).

El diseño de la estrategia de búsqueda se basó en la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses) donde se identificaron palabras claves en español (hongos podredumbre blanca, contaminación, colorantes, biorremediación, agua, biodegradación, hongos lignolíticos, lacasa, manganeso peroxidasa, lignina) e inglés (White rot fungi, contaminación, dyes, bioremediation, water, biodegradation, ligninolytic fungi, lacasse, manganese peroxidase, lignin) (**Figura 1**), con las que se establecieron 14 combinaciones usando operadores booleanos (**Tabla 1**); mientras que para especificidad se seleccionaron tres bases de datos bibliográficas: Scopus, PubMed y SciELO.

Tabla 1. Combinaciones de las palabras claves con el uso de operadores booleanos

No.	Combinaciones de las palabras claves para la búsqueda
Idioma: Inglés	
1	dyes AND biodegradation
2	dyes AND water AND contamination
3	dyes AND contamination AND fungi AND ligninolytic
4	bioremediation AND dyes AND white AND rot AND fungi
5	bioremediation AND white AND rot AND fungi AND laccase
6	bioremediation AND "white rot fungi" AND lignin
7	bioremediation AND white AND rot AND fungi AND manganese AND peroxidase
Idioma: Español	
8	colorantes AND biodegradación
9	colorantes AND agua AND contaminación
10	colorantes AND contaminación AND hongo AND ligninolíticos
11	biorremediación AND colorantes AND blanco AND podredumbre AND hongo
12	biorremediación AND blanca AND podredumbre AND hongo AND lacasa
13	biorremediación AND "hongo podredumbre blanca" AND lignina
14	biorremediación AND blanca AND podredumbre AND hongo AND manganeso AND peroxidasa

2.2 Criterios de inclusión y de exclusión

Entre los criterios de inclusión utilizados en esta revisión sistemática se incluyen artículos en los idiomas español e inglés, publicados entre el año 2018 y 2025, en los que el objetivo principal del estudio fuera analizar las estrategias de biodegradación de colorantes disueltos en agua mediante el uso de hongos de podredumbre blanca (**Figura 1**).

Se excluyeron las fuentes que no fueron evaluadas mediante revisión por pares académicos; asimismo, se descartaron los artículos escritos en idiomas distintos al español e inglés, artículos fuera del marco del tiempo seleccionado además de los estudios realizados con bacterias u hongos diferentes a los de podredumbre blanca y el material bibliográfico que incluyeron compuestos químicos para la degradación de los colorantes. (Figura 1).

2.3 Extracción y análisis de la literatura

Las citas encontradas fueron importadas al software de gestión de referencias bibliográficas Mendeley. Además, se realizó la extracción de datos utilizando la herramienta Microsoft Excel, en la cual se documentó la información de los estudios, las características fúngicas, los parámetros del proceso de biodegradación y los datos obtenidos, con el fin de eliminar duplicados entre las bases de datos consultadas. (Figura 1).

El análisis de la literatura se llevó a cabo en dos fases: primero, se revisaron los títulos y resúmenes, descartando aquellos artículos que no cumplieran con los criterios de inclusión; posteriormente, se realizó la lectura completa de los textos seleccionados, excluyendo nuevamente los que no cumplieran con estos criterios, lo que permitió obtener los artículos finales incluidos en esta revisión sistemática.

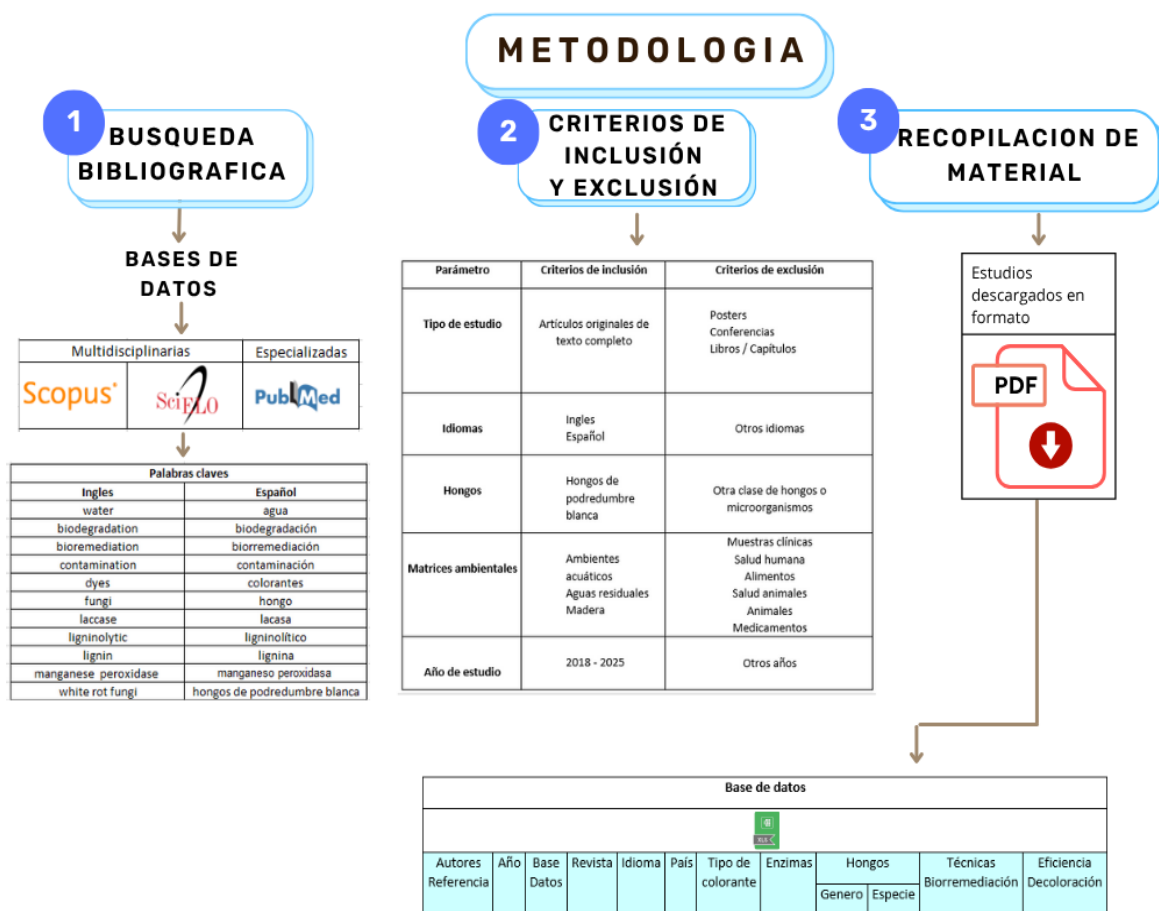


Figura 1. Esquema metodológico para la recopilación de artículos sobre hongos de podredumbre blanca biorremediadores de aguas residuales contaminados con colorantes.

3. RESULTADOS

La búsqueda de referencias arrojó un total de 42.356 artículos publicados entre los años 2018 y 2025, distribuidos de la siguiente manera: 14.096 en Scopus, 14 en SciELO y 28.246 en PubMed. Posteriormente, se excluyeron 8.134 artículos por año, tipo de documento e idioma; 7.546 artículos por título y por resumen. Tras la eliminación de duplicados y la aplicación de criterios específicos, se obtuvieron 142 artículos únicos. De estos, 72 fueron excluidos por no corresponder a estudios con hongos de podredumbre blanca, quedando finalmente 70 artículos que fueron incluidos en la síntesis cualitativa de esta revisión sistemática.

Tabla 2. Colección de artículos seleccionados 2018-2025

Autores	Año	Base de datos	revista	idioma	País	Tipo de colorante	Enzimas	Hongos	Técnicas de biorremediación	Eficiencia decoloración
Paula Andrea Bautista-Zamudio, María Alejandra Flórez Restrepo, Xiomara López-Legarda, Leidy Carolina Monroy-Giraldo, Freimar Segura-Sánchez (Bautista-Zamudio et al., 2023)	2023	Science direct	Science of The Total Environment	Inglés	NR	No mencionado	<ul style="list-style-type: none"> Lignina peroxidasa (LiP) Manganeso peroxidasa (MnP) Lacasas 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Phanerochaete chrysosporium</i> <i>Trametes versicolor</i> <i>Pleurotus ostreatus</i> <i>Bjerkandera adusta</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Gamma irradiación Incubación en medios <ul style="list-style-type: none"> Análisis FTIR SEM Estudios estructurales 	No reportado en porcentaje, pero indicaciones de deterioro superficial y cambios estructurales
Himanshu, Baishali Behera, Neetu Kumari, Mulaka Maruthi, R.K. Singh, J.K. Saini (Himanshu et al., 2025)	2024	ScienceDirect	Bioresource Technology	Inglés	India (la cepa fue aislada en Arunachal Pradesh, India)	<ul style="list-style-type: none"> Verde malaquita Catiónico 	Lacasa	<i>Trametes cubensis</i>	<ul style="list-style-type: none"> Fermentación en estado sólido (SSF) para producción de enzima Inmovilización en perlas de quitosano mediante entrecruzamiento con glutaraldehído Aplicación enzimática directa (enzima libre) y enzima inmovilizada 	<ul style="list-style-type: none"> 89 % con lacasa libre en 2 horas 86 % con lacasa inmovilizada en 2 horas La lacasa inmovilizada retuvo más del 52 % de su actividad después de 7 ciclos de uso
Byrd, J.D.; Khudyakov, I.; Azadi, P.; Montross (Byrd & Hood, 2022)	2022	SAGE Journals	Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy	Inglés	Estados Unidos	Azoico (Reactive Black 5 – RB5)	<ul style="list-style-type: none"> Manganeso peroxidasa (MnP) Lacasa (Laccase) 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Phanerochaete chrysosporium</i> <i>Trametes versicolor</i> 	Biorremediación enzimática (uso de enzimas fúngicas recombinantes para degradar colorantes)	70–90 % de eliminación del colorante RB5, según la enzima y condiciones
Monalisa Mahuri, Manish Paul, Hrudayanath Thatoi (Mahuri et al., 2023)	2023	SpringerLink	Systems Microbiology and Biomanufacturing	Inglés	India	No se especifica un tipo particular de colorante (se habla en general de tintes)	Lacasa	<ul style="list-style-type: none"> <i>Ascomycetes</i> <i>Deuteromycetes</i> <i>Basidiomycetes</i> 	Inmovilización de laccasa en biocátodos para decoloración de tintes en celdas de combustible microbianas	No se reporta porcentajes ni valores cuantitativos

Anna Civzele, Linda Mezule (Civzele & Mezule, 2024)	2024	PubMed	Frontiers in Fungal Biology	Inglés	Letonia/ europa	<ul style="list-style-type: none"> • Rojo congo • Azul de anilina • ABTS 	<ul style="list-style-type: none"> • Lacasas • Peroxidasas • Celulasas 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Trametes pubescens</i> • <i>Cerrena unicolor</i> • <i>Fomitopsis pinicola</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Degradación (decoloración) de tintes mediante enzimas fúngicas degradadoras de lignina. • Uso de ensayos cualitativos y cuantitativos para medir decoloración e actividad enzimática. • Evaluación de actividad de laccasa 	<ul style="list-style-type: none"> • Hasta 93.30 % reducción de intensidad de color del rojo Congo en 168 horas. • > 78 % decoloración de Azul de anilina en 168 horas. • Después de 336 horas: casi 99 % de remoción del Rojo Congo y hasta 99.79 % de decoloración de Azul de Anilina. • Especies menos comunes alcanzaron hasta 98.65 % Rojo Congo y 99.80 % Azul de Anilina
Luis F. Bautista, María T. Martínez, Ángel M. Rodríguez (Esteban et al., 2018)	2024	PubMed	Journal of Fungi	Inglés	España	<ul style="list-style-type: none"> • Azoicos • Antraquinónicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Lignina peroxidasa (LiP) • Manganeso peroxidasa (MnP) • Lacasas 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Trametes versicolor</i> • <i>Phanerochaete chrysosporium</i> • <i>Pleurotus ostreatus</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Cultivos líquidos (agitados/estáticos) • Uso de enzimas extracelulares ligninolíticas 	70–100% en pocos días
Delon Konan; Adama Ndao; Ekoun Koffi; Saïd Elkoun; Mathieu Robert; Denis Rodrigue; Kokou Adjallé (Konan et al., 2024)	2024	PubMed	AIMS Microbiology	Inglés	Canadá	Azo	<ul style="list-style-type: none"> • Lignina peroxidasa (LiP) • Manganeso peroxidasa (MnP) • Lacasa 	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Uso del hongo vivo (micelio) para degradación	<ul style="list-style-type: none"> •89% Reactive Black 5 •94% Reactive Red 120
Gugel, I.; Summa, D.; Costa, S.; Manfredini, S.; Vertuani, S.; Marchetti, F.; Tamburini, E (Gugel et al., 2024)	2024	Scopus	Fermentation	Inglés	Italia	Azo: <ul style="list-style-type: none"> • Orange II • Red 8-BLP • Direct Black 80 • Direct Yellow 11 • Basic Brown 1 	<ul style="list-style-type: none"> • Lignina peroxidasa (LiP) • Manganeso peroxidasa (MnP) • Lacasas 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Bjerkandera adusta</i> • <i>Phanerochaete chrysosporium</i> • <i>Trametes versicolor</i> 	Mycoremediación con hongos white-rot sobre residuos lácteos, combinando biosorción y degradación enzimática, dentro de un enfoque circular	<ul style="list-style-type: none"> • 70–80 % en 7 días (excepto Red 8 BLP) • Eliminación de lignina 80–90 % • Decoloración completa de Direct Black 80

Indunil S. Herath, Dhanushka Udayanga, D.J. Jayasanka, Choolaka Hewawasam (Herath et al., 2024)	2023	ScienceDirect	Heliyon	Inglés	Sri Lanka	Tintes textiles sintéticos (incluyendo azo y otros recalitrantes).	<ul style="list-style-type: none"> • Lignina peroxidasa (LiP) • Manganeso peroxidasa (MnP) • Lacasas 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pleurotus</i> • <i>Phanerochaete chrysosporium</i> • <i>Trametes</i> • <i>Ganoderma</i> • <i>Lentinus</i> • <i>Ceriporia lacerata</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Biodegradación enzimática → principal mecanismo de decoloración. • Biosorción → los tintes se adhieren a la biomasa fúngica. • Cultivo en medio líquido con adición de tintes para evaluar la decoloración. • Optimización de parámetros: pH, temperatura, concentración inicial del tinte, nutrientes, agitación y presencia de metales pesados. 	La eficiencia depende de parámetros ambientales y de cultivo
Retno Agnestisia, Desimaria Panjaitan, Togtokhbayar Erdene-Ochir, Yanetri Asi Nion, Eka Putra Ramdhani, Eka Jhonatan Krissilvio, y Karelius Karelius (Agnestisia et al., 2024)	2024	Scopus	BIO Web of Conferences	Inglés	Indonesia	Rodamina B	Lacasa	<i>Corioloopsis caperata</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Decoloración en medio líquido modificado de glucosa-peptona. • Cultivo estático en matraces con 100 mL de medio + discos de micelio. • Suplementación con veratryl alcohol para inducir producción de lacasa. • Incubación a 27 ± 2 °C en oscuridad por 2–16 días. 	83% en 12 días a 60 mg/L de Rodamina B
Wei Deng, Mingrui Ge, Ziyi Wang, Chenwen Weng, Yang Yang (Deng et al., 2024)	2024	ScienceDirect	Ecotoxicology and Environmental Safety	Inglés	China	<ul style="list-style-type: none"> •Azoicos •Antraquinónicos •Trifenilmetanos •Índigo 	• Lacasa (Lac)	<i>Ganoderma lucidum</i>	<ul style="list-style-type: none"> •Biorremediación enzimática con laccasa purificada •Ensayos en modo batch y continuo 	<ul style="list-style-type: none"> •Orange G 75.94% •Acid Orange 7 93.30% •Remazol Brilliant Blue R 96.56% •Bromophenol Blue 99.94% •Methyl Green 96.37% •Indigo Carmine 37.23%
Kumar, Rajesh; Sharma, Aarti;	2024	Pubmed	Journal of Fungi	Inglés	India	Sintéticos textiles (principalment	<ul style="list-style-type: none"> • Lacasas • Peroxidasas 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Trametes versicolor</i> • <i>Phanerochaete</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamientos enzimáticos con enzimas libres y fijas 	Alta, alcanzando en varios estudios entre el 70–100%

Kumar, Vijay; Shukla, Pratyooch (Torres-Farradá et al., 2024)						e azo, antraquinona y trifenilmetano)	(MnP, LiP) • Tirosinasas	<i>chryso sporium</i> • <i>Pleurotus ostreatus</i> • <i>Ganoderma lucidum</i>	• Uso de micelio vivo e inmovilizado • Sistemas de biorreactores • Tratamientos combinados físico-químicos/biológicos.	de remoción de colorantes bajo condiciones controladas de laboratorio.
Flávia C. R. Costa; Fábio S. L. Brito; María Júlia R. de Grandi; Juliana F. S. Daniel (Costa et al., 2025)	2025	SciELO Brasil	Journal of the Brazilian Chemical Society	Inglés	Brasil	• Azo • Anthraquinone • Triphenylmethane • Xanthene • Indigoid • Phthalocyanine • Cationic/basic • Reactive • Direct • Disperse • Vat • Sulfur • Mordant	• Lignina peroxidasa (LiP) • Manganeso peroxidasa (MnP) • Lacasas	• <i>Trametes versicolor</i> • <i>T. polizona</i> • <i>Ganoderma lucidum</i> • <i>Phanerochaete velutina</i> • <i>Pleurotus eryngii</i> • <i>Ganoderma sp</i> • <i>Perenniporia subtephropora</i> • <i>Trametes hirsuta</i> • <i>T. flavida</i> • <i>T. gibbosa</i> • <i>T. villosa</i> • <i>T. pubescens</i> • <i>T. trogii</i>	• Cultivos en batch • Enzimas libres/inmovilizadas • Biorreactores fúngicos con membrana (FMBR) • Fotocatálisis con ZnO combinada	• <i>T. hirsuta</i> : 84.57% en 48 h (pH 4) • <i>G. lucidum</i> : 86.79% en 24 h (sintético) • <i>T. versicolor</i> : 98% en 144 h (MnP, laccasa, VeP)
Guntur Adisurya Ismail, Hiroshi Sakai (Ismail & Sakai, 2022)	2021	ScienceDirect	Chemosphere	Inglés	Japón (Tokyo Metropolitan University) e Indonesia (Bandung Institute of Technology)	• Azo • Antraquinona • Triarilmetano	• Azo-reductasa • Lacasa • Peroxidasa	No se especifica	• Procesos biológicos (anaeróbicos y aeróbicos). • Procesos basados en hongos (fungi-based).	Los colorantes azo suelen ser los más fáciles de decolorar; los antraquinona presentan buena decoloración pero baja mineralización.
Leidy D. Ardila-Leal, Raúl A. Poutou-Piñales, Aura M. Pedroza-Rodríguez, Balkys E. Quevedo-Hidalgo (Ardila-Leal et al., 2021)	2021	Scopus	Molecules	Inglés	Colombia (Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá)	Colorantes sintéticos • Azo • Antraquinona • Trifenilmetano • indigoides	• Lacasas (oxidoreductasas multicobre) • Lignina peroxidasa (LiP) • Manganeso peroxidasa (MnP) • Azoreductasas	• <i>Pleurotus ostreatus</i> • <i>Trametes versicolor</i> • <i>Ganoderma lucidum</i> • <i>Phanerochaete chryso sporium</i>	• Uso de enzimas libres • enzimas inmovilizadas • sistemas secuenciales en laboratorio • consorcios microbianos (hongos + bacterias) • sistemas lacasa-mediador.	Reportada como alta (80–100%) dependiendo del tipo de colorante, mediador y condiciones de operación (pH, temperatura, concentración).

Heli Patel, Virendra Kumar Yadav, Krishna Kumar Yadav, Nisha Choudhary, Haresh Kalasariya, M. Mujahid Alam, Amel Gacem, Mohammed Amanullah, Hala A. Ibrahim, Jae-Woo Park, Sungmin Park y Byong-Hun Jeon. (Patel et al., 2022)	2022	Scopus	Water	Inglés	Autores de India, Corea del Sur, Arabia Saudita, Egipto, Argelia y Reino Unido (revisión multinacional).	<ul style="list-style-type: none"> Colorantes azo Antraquinonas Indigoides Triphenylmethane. 	<ul style="list-style-type: none"> Lacasas Lignina peroxidasa (LiP) Manganeso peroxidasa (MnP) Azoreductasas 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Phanerochaete chrysosporium</i> <i>Pleurotus ostreatus</i> <i>Trametes polizona</i> <i>Trametes hirsuta</i> <i>Schizophyllum sp.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Micorremediación (hongos de podredumbre blanca y no-blanca). Biorremediación bacteriana Fitoremediación Enzimas libres o extraídas (lacasas, peroxidasa, azoreductasas). Biosorción (biomasa viva, seca o nanoparticulada). 	<ul style="list-style-type: none"> Bacterias solas: 70–96% Consortios bacterianos: hasta 99% Hongos (WRF y no-WRF): 70–100% Algas: 40–100% Enzimas aisladas: 80–100% Biofilms/consorcios mixtos: 90–100%
Waqas Latif, Claudia Ciniglia, Manuela Iovinella, Muhammad Shafiq, Stefania Papa. (Latif et al., 2023)	2023	PubMed	Applied Sciences.	Inglés	Italia (Università degli Studi della Campania “Luigi Vanvitelli”) y Pakistán (University of the Punjab).	<ul style="list-style-type: none"> Colorantes textiles recalcitrantes Azo Antraquinona Trifenilmetano 	<ul style="list-style-type: none"> Lignina peroxidasa (LiP) Manganeso peroxidasa (MnP) Lacasa (Lac) además de enzimas accesorias como Peroxidasas versátiles Celobiosa deshidrogenasa Hidrolasas. 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Phanerochaete chrysosporium</i> <i>Trametes versicolor</i> <i>Trametes pubescens</i> <i>Pleurotus ostreatus</i> <i>Pleurotus eryngii</i> <i>Phlebia brevispora</i> <i>Ganoderma sp.</i> <i>Anthraco-phyllum discolor</i> <i>Pleurotus pulmonarius</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Fermentación en estado sólido (SSF). Fermentación sumergida (SmF). Sistemas inmovilizados. Co-cultivos hongo–bacteria. Tratamiento enzimático con enzimas aisladas. 	<ul style="list-style-type: none"> SSF: 80–95% SmF: 70–99% Hongos inmovilizados: 95–99% Enzimas aisladas: 80–100% Co-cultivos hongo–bacteria: 92–100%
Irene Gugel; Daniela Summa; Stefania Costa; Stefano Manfredini; Silvia Vertuani; Filippo Marchetti; Elena Tamburini (Gugel et al., 2024)	2024	Scopus	Fermentation	Inglés	Italia	<ul style="list-style-type: none"> Tintes azoicos sintéticos: Orange II Red 8 BLP Direct Black 80 Direct Yellow 11 Basic Brown 1 	<ul style="list-style-type: none"> Lignina peroxidasa (LiP) Manganeso peroxidasa (MnP) Lacasas 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Bjerkandera adusta</i> <i>Phanerochaete chrysosporium</i> <i>Trametes versicolor</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Cultivo en residuos lácteos Aplicación en soluciones de colorantes y efluentes Espectrofotometría Lignina (AIR/ASL) 	<ul style="list-style-type: none"> Elevada: en soluciones sintéticas >70–100% En efluentes reales hasta 80–95% (dependiendo del hongo y condiciones)
A. P. Periyasamy (Periyasamy, 2025)	2025	ScienceDirect	Cleaner Water	Inglés	No se centra en un país específico; es una revisión global de	<ul style="list-style-type: none"> Azo Antraquinona Ftalocianinas Colorantes reactivos. 	<ul style="list-style-type: none"> Lacasas Peroxidasas Azoreductasas Tirosinasas 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Pleurotus ostreatus</i> <i>P. eryngii</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Biodegradación enzimática Biosorción por hongos, algas y bacterias 	<ul style="list-style-type: none"> Hongos: Presentan eficiencias altas usualmente entre 90% y 100% Algas (microalgas)

					estudios de bioremediación.				<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de inmovilización de enzimas y microorganismos • Sistemas bio-electroquímicos (celdas de combustible microbianas y de electrólisis) • Combinación con procesos avanzados de oxidación (ej. Fenton + biodegradación) 	y macroalgas): También muestran una alta eficiencia, con rangos de 70 % a 100 %. <ul style="list-style-type: none"> • Bacterias: Se reportan eficiencias entre 90 % y 100 % • Enzimas aisladas: su eficiencia depende del tipo de enzima y colorante, con valores que van desde 75 % hasta casi 100 %.
Ziyi Wang, Chenwen Weng, Xin Yi Wu, Wei Deng, Yang Yang (Wang et al., 2025)	2025	PubMed	International Journal of Biological Macromolecules	Inglés	China (Wuhan)	<ul style="list-style-type: none"> • Azoicos • Antraquinónicos • Trifenilmetanos • tintes individuales y mixtos 	Lacasa LAC-Yang1	<i>Pleurotus ostreatus</i>	Enzima libre en reacciones por lotes repetidas sobre tintes simples y mixtos	Decoloración del 57,57 % en 0,5 horas, usando 0,5 U/mL de enzima.
Nagraj et al. (Nagraj et al., 2025)	2025	ScienceDirect	The Microbe	Inglés	No se menciona un único país, ya que es una revisión con estudios de distintos lugares.	Azo	<ul style="list-style-type: none"> • Lacasas (Lac) • Lignina peroxidasa (LiP) • Manganoso peroxidasa (MnP) • Enzimas extracelulares de diferentes hongos. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pleurotus ostreatus</i> • <i>Trametes polyzona</i> • <i>Phellinus noxius</i> • <i>Leotrametes menziesii</i> • <i>Lentinus sajor-caju</i> • <i>Ganoderma lucidum</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Micorremediación en estado sólido y líquido • Uso de enzimas ligninolíticas • Co-cultivos de hongos y bacterias • Inmovilización en soportes (ej. salvado, sorgo, residuos agrícolas) 	Varía según el hongo y el tinte: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Pleurotus ostreatus</i>: hasta 97 % (methyl orange) • <i>Trametes polyzona</i>: > 75 % • <i>Ganoderma lucidum</i>: 95.16 % (Direct Red 5B)
C. Zafiu, S. Küpcü, M. A. Kähkönen (Scopus - Document Details - Decolorization of Reactive Dyes by the White Rot Fungus <i>Phanerochaete velutina</i> in Presence of Zn and	2024	SpringerLink	International Journal of Environmental Science and Technology	Inglés	Finlandia (University of Helsinki) y Austria (University of Natural Resources and Life Sciences, Viena)	<ul style="list-style-type: none"> • Reactive Orange 16 • Reactive Green 19 	<ul style="list-style-type: none"> • Lacasas • Peroxidasas 	<i>Phanerochaete velutina</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de cultivo líquido del hongo. • Evaluación de sinergia con nanopartículas de ZnO y Zn²⁺ para mejorar la decoloración. • Ensayos cinéticos para determinar tasas de decoloración. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reactive Orange 16: hasta 79 % con ZnO-NP a 2500 µg/L, frente a solo 24 % sin nanopartículas. • Reactive Green 19: hasta 69 % con ZnO-NP a 2500 µg/L, frente a 11 % sin nanopartículas.

ZnO Nanoparticles Signed In, n.d.)										
Dhokane Juilee P., Patil Sunita H., Patil Sucheta N., Patil Niranjan P. (Juilee et al., 2025)	2025	Scopus	Research Journal of Biotechnology	Inglés	India	Remazol Brilliant Blue R (RBBR)	Lacasa	<i>Cerrena unicolor</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de enzima purificada (lacasa). • Optimización por One Variable At a Time (OVAT). • Response Surface Methodology (RSM) con diseño compuesto central (CCD). • Evaluación de degradación con UV-Vis y HPLC-MS. 	<ul style="list-style-type: none"> • 91.8 % a 100 ppm en 12 horas. • 34.8 % a 600 ppm en 12 horas. • 85 % decoloración a 275 ppm y 40 °C (condiciones óptimas).
Gutiérrez-Soto, Hernández-Luna, López-Sandín, Parra-Saldívar, Elizondo-Luevano (Gutiérrez-Soto et al., 2025)	2025	Scopus	Environments	Inglés	México y Reino Unido	<ul style="list-style-type: none"> • Acid Red 44 • Orange II • Indigo Blue • Brilliant Blue R • Remazol Brilliant Blue R • Crystal Violet • Acid Green 27 • Reactive Black 5 • Poly R-478 	<ul style="list-style-type: none"> • Lacasas Isoenzimas: <ul style="list-style-type: none"> • Th1a • Th1b • Th11 	<i>Trametes hirsuta</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Purificación cromatográfica • Ensayos de decoloración 	<ul style="list-style-type: none"> • Th11 alcanzó 91 % con Acid Red 44. • 76 % con Orange II.
G.B. Singh et al. (Singh et al., 2024)	2024	Scopus	Environmental Technology & Innovation	Inglés	No se centra en un país específico, es una revisión internacional	Colorantes azo: <ul style="list-style-type: none"> • Congo red • Reactive Black 5 • Acid Orange 7 • Reactive Red 120 	<ul style="list-style-type: none"> • Lacasas • Manganeso peroxidasas • Peroxidasas 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Trametes versicolor</i> • <i>Ganoderma lucidum</i> • <i>Phanerochaete chrysosporium</i> • <i>Penicillium salinarum</i> • <i>Aspergillus flavus</i> • <i>Aspergillus niger</i> 	Uso de hongos de podredumbre blanca y filamentosos en sistemas de adsorción + degradación enzimática.	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Ganoderma lucidum</i>: 77 % en 19 días (Acid Orange 7) • <i>Trichoderma tomentosum</i>: 99.2 % en 72 h (Acid Red 3R) • <i>Phanerochaete chrysosporium</i>: 82–94 % en 10 días (Reactive Red 120, Reactive Black 5, Direct Yellow 27)
Shweta Kalia, Saurabh Samuchiwal, Vivek Dalvi, Anushree Maik	2024	Scopus	Chemosphere	Inglés	India (el hongo se obtuvo del CFTRI, Mysore, India)	Tintes reactivos <ul style="list-style-type: none"> • Reactive Blue 13 RB13 • Reactive Black 5 – RB5 	Lacasa	<i>Pleurotus sajor-caju</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Biomasa fúngica en crecimiento • Decoloración mediada por lacasa parcialmente purificada 	Biomasa fúngica en crecimiento: <ul style="list-style-type: none"> • RB13 → 83–87 % en 8 días • RB5 → 62–83 %

(S. Kalia et al., 2024)						<ul style="list-style-type: none"> • Reactive Yellow 176 • Reactive Red 198 				<p>en 8 días Decoloración mediada por lacasa parcialmente purificada:</p> <ul style="list-style-type: none"> • RB13 → 89–90 % en 100 min (30 °C, pH 3.0) • RB5 → 33–51 % en 100 min
Susana Rodríguez-Couto (Torres-Farradá et al., 2024)	2024	Scopus	Journal of Fungi	Inglés	Revisión internacional (no enfocado en un país específico)	<ul style="list-style-type: none"> • Azo • Antraquinona • Colorantes reactivos 	<ul style="list-style-type: none"> • Lacasa • Manganeso peroxidasa (MnP) • Lignina peroxidasa (LiP) • Versátil peroxidasa (VP) 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Trametes versicolor</i> • <i>Pleurotus ostreatus</i> • <i>Phanerochaete chrysosporium</i> • <i>Bjerkandera adusta</i> • <i>Ganoderma lucidum</i> • <i>Irpex lacteus</i> • <i>Lentinus tigrinus</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Cultivo con hongos de podredumbre blanca en medios líquidos o sólidos • Uso de enzimas fúngicas (lacasas, peroxidases) aisladas o inmovilizadas • Sistemas de biorreactores 	<ul style="list-style-type: none"> • Cultivo con hongos de podredumbre blanca en medios líquidos o sólidos → decoloración >80 % en varios colorantes azo y reactivos. • Uso de enzimas fúngicas (lacasas, peroxidases) aisladas o inmovilizadas → decoloraciones rápidas (60–95 % en pocas horas). • Sistemas de biorreactores
H. Zouari-Mechichi; J. Benali; A. H. Alessa; B. Hadrich; T. Mechichi (Zouari-Mechichi et al., 2024)	2024	Pubmed	Molecules	Inglés	No se menciona un país	<ul style="list-style-type: none"> • Sirius Grey • Poli-azo 	Laccasa (laccase) + sistema mediador (1-hidroxibenzotriazol, HBT) utilizado para mejorar la acción de la laccasa.	<i>Corioliopsis gallica</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Se usó sobrenadante libre de células que contiene la laccasa <ul style="list-style-type: none"> • Optimización mediante diseño experimental tipo Box–Behnken, variando pH, concentración de enzima, concentración de mediador, concentración del colorante • Ensayos de decoloración en condiciones controladas en laboratorio • Evaluación de la toxicidad 	87.56 % de decoloración para 50 mg/L de colorante

Jothika Jeyabalan, Ajithkumar Veluchamy, Vishnu Priyan V, Ajit Kumar, Ragavan Chandrasekar, Selvaraju Narayanasamy. (Jeyabalan et al., 2023)	2023	Scopus	Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers	Inglés	No se menciona un país	<ul style="list-style-type: none"> • Azo • Antraquinona 	Lacasa	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Trametes</i> • <i>Pleurotus</i> • <i>Coriolopsis</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de lacasas libres y lacasas inmovilizadas (adsorción, unión iónica, covalente, atrapamiento, encapsulación). • Sistemas sinérgicos: combinación de lacasa con otras enzimas o agentes químicos. • Sistemas enzimáticos in vitro y también aplicaciones industriales (efluentes textiles). 	Se destaca que con lacasas inmovilizadas y sistemas mediadores, la eficiencia mejora significativamente (en algunos casos con decoloraciones >80–90%).
Indunil S. Herath, Tharusha Sulaksha, Namita Maharjan, Dhanushka Udayanga, Jasintha Jayasanka, Yuki Murakami & Choolaka Hewawasam. (Herath et al., 2025)	2025	Taylor & Francis	Bioremediation Journal	Inglés	Sri Lanka	<ul style="list-style-type: none"> • Remazol Brilliant Blue R (RBBR) → antraquinona • Reactive Orange 16 (RO16) → monoazo • Reactive Black 5 → diazo • Amaranth → monoazo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lignina peroxidasa (LiP) • Manganeso peroxidasa (MnP) • Lacasas 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Earliella scabrosa</i> • <i>Lentinus squarrosulus</i> • <i>Schizophyllum commune</i> • <i>Trametes sp.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos en agar sólido suplementado con los colorantes. • Método del Volumen de Placa (PVM) para cuantificar porcentajes de decoloración. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Lentinus squarrosulus</i> → 100% en RBBR • <i>Trametes sp.1</i> → Solo decoloraron RBBR, alcanzando 100% incluso a 150 ppm • <i>Schizophyllum commune</i> → No mostró decoloración. • <i>Earliella scabrosa</i> → Decoloró los 4 colorantes, con eficiencias del 100%
Harmen Shah, Faridah Yusof & Md Zahangir Alam (Shah et al., 2023)	2023	Taylor & Francis	Bioremediation Journal	Inglés	Malasia	Congo Red (azo colorante sintético)	Lacasa extracelular	<i>Resinicium bicolor</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Decoloración en medio sólido usando el método Plate Volume Method (PVM). • Cultivos líquidos para validar la eficiencia. • Biorremediación enzimática sin necesidad de mediadores químicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • 97.79% en medio sólido (96 h). • 96.79% en cultivo líquido (96 h).
Qaisar Mahmood, Yuanyuan Ma, Mingming Zhou, Yiguo Hong,	2021	Taylor & Francis	International Journal of Food Properties	Inglés	China (Instituto de Ciencias y Tecnología,	<ul style="list-style-type: none"> Azo y antraquinona • Reactive Black 5 	Peroxidasa extracelular	<i>Phlebia radiata</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Purificación y caracterización enzimática. • Ensayos de 	93–97% de decoloración

Shuangfei Zhang, Ling Luo & Guoqiang Li (Bouacem et al., 2022)					Universidad de Nanjing)	<ul style="list-style-type: none"> • Remazol Brilliant Blue R 			decoloración enzimática de colorantes sintéticos en condiciones in vitro.	
Shilpa Saikia, Meera Yadav, Rohida Amin Hoque & Hardeo Singh Yadav (Saikia et al., 2023)	2023	Taylor & Francis	Biocatalysis and Biotransformation	Inglés	India	<ul style="list-style-type: none"> • Azo • Antraquinona • Indigo • Triphenylmethane reactivos como • Reactive Black-5 • Congo Red • Direct Red-5B • Methyl Green • Indigo Carmine • Cibacet Brilliant Blue • Remazol Brilliant Violet 	<ul style="list-style-type: none"> • Lignina peroxidasa (LiP) • Manganeso peroxidasa (MnP) • Lacasas 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Phanerochaete chrysosporium</i> • <i>Trametes pubescens strain i8</i> • <i>Bjerkandera adusta strain CX-9</i> • <i>Pleurotus ostreatus</i> • <i>Pleurotus sajor-caju</i> • <i>Ganoderma lucidum</i> • <i>Irpex lacteus</i> • <i>Datronia sp.</i> • <i>Cerrena unicolor BBP6</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Biodegradación enzimática (uso de MnP y otras ligninolíticas) • Adsorción + degradación enzimática • Biorreactores de lecho empacado y sólidos fermentados (SSF) • Tratamiento combinado biológico–electroquímico 	Hasta 95–100% en algunos colorantes
Ian David Araújo Cruz, Valter Cruz-Magalhães, Leandro Lopes Loguercio, Lorena Brito Pimentel Rodrigues dos Santos, Ana Paula Trovatti Uetanabaro & Andréa Miura da Costa (Cruz et al., 2024)	2024	PubMed	Preparative Biochemistry & Biotechnology	Inglés	Brasil	<ul style="list-style-type: none"> • Malachite Green • Remazol Brilliant Blue R • Congo Red • Methylene Blue • Crystal Violet • Indigo Carmine • Reactive Black 5 • Methyl Orange 	<ul style="list-style-type: none"> • Lacasas 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Trametes versicolor</i> • <i>T. pubescens</i> • <i>T. hirsuta</i> • <i>T. trogii</i> • <i>T. máxima</i> • <i>T. polizona</i> • <i>Pleurotus ostreatus</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Fermentación sumergida (SmF) y fermentación en estado sólido (SSF) para producir lacasas. • Uso de enzimas libres y enzimas inmovilizadas. • Métodos de inmovilización: atrapamiento, unión covalente, adsorción y entrecruzamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • La inmovilización por unión covalente mostró hasta 98,5% de eficiencia • El atrapamiento alcanzó 94% de eficiencia
Swarnkumar Reddy & Jabez Osborne (Reddy & Osborne, 2022)	2022	Taylor & Francis	Urban Water Journal	Inglés	India	<ul style="list-style-type: none"> • Azo • Diazo • Sulfonados reactivos 	<ul style="list-style-type: none"> • Azoreductasa • Lacasa • Lignina 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pleurotus eryngii</i> • <i>Phanerochaete chrysosporium</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Biodegradación enzimática (hongos y bacterias) • Bioreactores: 	100% degradación de Congo Red

						<ul style="list-style-type: none"> • Congo Red • Reactive Black 5 • Direct Red 81 • Victoria Blue R, Amaranth, Trypan Blue 	<ul style="list-style-type: none"> peroxidasa • Veratryl peroxidasa • Versatile peroxidase (VP) • DyP-type peroxidase 		<ul style="list-style-type: none"> - Sequencing Batch Reactors (SBR) - Membrane Bioreactors (MBR) - Hybrid bioreactors (SBR + nanofiltración, ozonación + bacterias, etc.) - Stirred Tank Reactors (STR) - Airlift Bioreactors (ALR) - Microbial Fuel Cells (MFC) 	
Muhammad Riaz, Saima Sadaf, Irfana Naheed, Asifa Ashraf, Arshad Javaid, Samia Sultan, Kashif Rahim, Muhammad Ali & Khurram Shehzad (Coelho et al., 2024)	2021	SpringerLink	Environmental Science and Pollution Research	Inglés	Pakistán	<ul style="list-style-type: none"> • Congo Red (azo colorante sintético) 	Lacasa	<i>Lentinus sp</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos in vitro (cultivo del hongo y actividad enzimática de la lacasa) • Ensayos in silico (acoplamiento molecular para estudiar la interacción entre lacasa y Congo Red). • Uso de enzima cruda y purificada para degradación del colorante. 	eficiencia de degradación del Congo Red del 95%
Dede Heri Yuli Yanto, Sita Heris Anita & Nissa Nurfajrin Solihat (Yanto et al., 2024)	2024	Taylor & Francis	Biocatalysis and Biotransformation	Inglés	Indonesia	<ul style="list-style-type: none"> Antraquinónico • Acid Blue 129 • AB129 azo 	Lacasa	<i>Trametes hirsuta</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de lacasa en fermentación sólida. • Aplicación de lacasa cruda en solución con colorantes. • Decoloración medida espectrofotométricamente. • Identificación de metabolitos mediante LC-HRMS y LC-MS/MS 	<ul style="list-style-type: none"> • AB129: 88% en 7 h • AB113: 73% • RBBR: 71% • AB25: 72% • RB4: 42% • RB5: 6%
Ade Andriani & Dede Heri Yuli Yanto (Andriani & Yanto, 2022)	2022	Taylor & Francis	Biocatalysis and Biotransformation	Inglés	Indonesia	<ul style="list-style-type: none"> • Remazol Brilliant Blue R (RBBR, antraquinona) • Reactive Green 19 (RG, azo) • Cibacron Brilliant Red 	<ul style="list-style-type: none"> • Lignina peroxidasa (LiP) • Manganeso peroxidasa (MnP) 	<i>Bjerkandera adusta</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Cultivo sumergido con células libres (SFC) • Perlas de alginato inmovilizadas sumergidas (SIB) <ul style="list-style-type: none"> • Biorreactor empaquetado con 	<ul style="list-style-type: none"> • General: 10,8% – 97,3% según el colorante, método y condiciones • Mejor resultado: hasta 97% de decoloración en SFC (células libres) • RBBR fue el más

						3B-A (BR, monoclorotriazina) • Brilliant Green (BG, triarilmetano) • Azure B (AB, trimetiltioazina)			perlas de alginato (APB)	degradado; RG el más recalcitrante
Büşra Bakar, Emre Birhanlı, Ahmet Ulu, Filiz Boran, Özfer Yeşilada & Burhan Ateş (Bakar et al., 2024)	2024	Taylor & Francis	Biocatalysis and Biotransformation	Inglés	Turquía	• Remazol Brilliant Blue R (RBBR, antraquinona, Reactive Blue 19) • Indigo Carmine (IC, indigoide, Acid Blue 74)	Lacasa	<i>Trametes trogii</i>	• Producción de laccasa a partir de <i>T. trogii</i> • Inmovilización de la enzima sobre nanopartículas magnéticas de Fe ₃ O ₄ recubiertas con polivinilpirrolidona (Fe ₃ O ₄ /PVP MNPs) • Ensayos de decoloración en sistemas de laboratorio con ciclos repetidos	• RBBR: hasta 78% en el primer ciclo con 20 mg de enzima inmovilizada • IC: hasta 76% en el primer ciclo con 20 mg de enzima inmovilizada
Khadiza Akter Tania, Md. Arifur Rahman Bhuiyan, Era Juliet Das, Mirana Tahsin (Tania et al., 2024)	2024	Taylor & Francis	Bioremediation Journal	Inglés	Bangladesh	Azo colorantes • Methyl Orange (MO) • Methyl Red (MR)	• Lacasas • Peroxidasas • Azoreductasas	<i>Pleurotus ostreatus</i>	• Micorremediación en medio líquido (cultivo en matraces con agitación y condiciones controladas de pH, temperatura, volumen de inóculo e incubación) • Evaluación de absorción/decoloración mediante espectrofotometría UV-Vis	• Methyl Orange (MO): hasta 97% en 18 días • Methyl Red (MR): hasta 93% en 18 días
Baby Malleswari Ramayanam (Ramayanam, 2025)	2025	Taylor & Francis	Essential Chem	Inglés	India	Azo colorantes	Lacasa	<i>Trametes versicolor</i>	• Producción optimizada de laccasa mediante fermentación sumergida en diferentes medios nutritivos. • Aplicación de la enzima laccasa purificada para la decoloración de efluentes textiles	hasta 99% de reducción de color

									(ensayos desde matraces hasta escala piloto de 1000 L).	
Emanueli Backes, Camila G. Kato, Tamires B. V. da Silva, Thaís M. Uber, Daniela L. Pasquarelli, Adelar Bracht (Backes et al., 2022)	2022	Taylor & Francis	Biotechnology and Applied Biochemistry	Inglés	Brasil	Verde Malaquita	Lacasa	<i>Trametes versicolor</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fermentación en estado sólido (SSF) usando coronas de piña como sustrato para producción de lacasa. • Aplicación de la enzima cruda en soluciones de Verde Malaquita. • Evaluación de desintoxicación con bioensayo de semillas de <i>Lactuca sativa</i>. 	60% en 12 h y 80% en 24 h de incubación
Sadia Zafar, Dilara A. Bukhari, Abdul Rehman (Zafar et al., 2022)	2022	ScienceDirect	Saudi Journal of Biological Sciences	Inglés	Pakistán	Azoico	<ul style="list-style-type: none"> • Azoreductasas • Laccasas • Manganoso-peroxidasa • Lignina-peroxidasa 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Trametes hirsuta</i> • <i>Aspergillus flavus</i> • <i>Phanerochaete chrysosporium</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de hongos de podredumbre blanca • Sistemas aerobios-anaerobios combinados 	Entre 80 % y 98 % según la cepa
Gulay Bayramoglu y Mehmet Yakup Arica (Niazi et al., 2024)	2019	Taylor & Francis	Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry	Inglés	Turquía	<ul style="list-style-type: none"> • Methylene Blue (tinte catiónico) • Carbaryl (pesticida) 	Lacasa	<i>Trametes versicolor</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de lacasa libre y lacasa inmovilizada en microesferas poliméricas funcionalizadas (con grupos epóxido y carbonato). • Sistema con y sin mediador (acetosyringone). • Ensayos en reactor de lecho fluidizado para operación continua. • Evaluación de factores de pH y temperatura sobre la actividad enzimática (óptimos: pH 5–5.5 y 30–40 °C). 	<ul style="list-style-type: none"> • Con mediador: casi 100% de degradación de Methylene Blue y Carbaryl en 2 h. • Sin mediador: 63% (MB) y 71% (Carbaryl). • Con enzima libre + mediador: 87% (MB) y 93% (Carbaryl).

Si J., Li X-C., Cui B-K. (Aslam & Bilal, 2022)	2022	SpringerLink	Enzymes for Pollutant Degradation	Inglés	China	Neutral Red (colorante heterocíclico)	Ligninolíticas • Lacasas • Peroxidasas LiP y MnP	<i>Perenniporia subacida</i>	Decoloración biológica mediante cultivo del hongo en condiciones controladas	Alta eficiencia
Christian Zafiu, Florian Part, Eva-Kathrin Ehmoser, Mika A. Kähkönen (Zafiu et al., 2021)	2021	ScienceDirect	Ecotoxicology and Environmental Safety	Inglés	Austria	• Reactive Orange 16 (RO-16) • Remazol Brilliant Blue R (RBBR)	• Lacasas • Lignina peroxidasa (LiP) • Manganeso peroxidasa (MnP) • Azoreductasas • Enzimas extracelulares oxidativas	<i>Phanerochaete velutina</i>	Decoloración biológica en ensayos de microplacas (miniaturizados, alto rendimiento), con cultivo vivo del hongo incluso en presencia de sales de Ni y Co	• RO-16: hasta 55% decoloración en 14 días (tasa máxima 0.09 d ⁻¹ , vida media 8 días) • RBBR: decoloración afectada por metabolito fúngico; IC50 = 3.37 mg/L para Co y 7.58 mg/L para Ni
Wajid Waheed, Aqeel Ahmad Tauseef, Yasir Jamil, Talha Bin Emran, Muhammad Bilal (Chicatto et al., 2018)	2021	Taylor & Francis	Critical Reviews in Environmental Science and Technology	Inglés	Pakistán y Bangladesh	• Azo • Antraquinona • Trifenilmetano	• Lacasas • Lignina peroxidasa (LiP) • Manganeso peroxidasa (MnP) • Azoreductasas	• <i>Trametes versicolor</i> • <i>Phanerochaete chrysosporium</i> • <i>Pleurotus ostreatus</i>	• Procesos enzimáticos • Cultivo sumergido y en estado sólido • Sistemas de biorreactores • Bioadsorción y biodegradación	Alta (se reportan valores superiores al 90% en condiciones óptimas, dependiendo del hongo y el tipo de colorante)
Cecilia Ricaczeski, Eduardo El Akkari Sallum, Carlos Ricardo Soccol, Esteffany Helscher Candeo, Maria Luísa Cerri, Eduardo Bittencourt Sydney & Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli. (Ricaczeski et al., 2025)	2025	Taylor & Francis	Preparative Biochemistry & Biotechnology	Inglés	Brasil	Efluente textil real (mezcla de colorantes y compuestos tóxicos de la industria textil, no un solo colorante específico).	• Lignina peroxidasa (LiP) • Manganeso peroxidasa (MnP).	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	• Inmovilización del hongo en espuma de poliuretano. • Cultivo en biorreactor a escala de laboratorio. • Optimización de condiciones de crecimiento (pH, relación C/N, fósforo). • Uso de efluente textil real como medio de cultivo para inducir la producción enzimática.	• Producción de LiP: 70 U L ⁻¹ . • Producción de MnP: 15,32 U L ⁻¹ .
Shilpa Saikia, Meera Yadav, Rohida Amin Hoque & Hardeo Singh Yadav (Saikia et al., 2023)	2023	Taylor & Francis	Biocatalysis and Biotransformation	Inglés	India	Sintéticos • Azo • Antraquinona • Índigo • Triphenyl methane	• Lignina peroxidasa (LiP) • Manganeso peroxidasa (MnP) • Lacasas	• <i>Phanerochaete chrysosporium</i> • <i>Bjerkandera adusta</i> • <i>Trametes pubescens</i> • <i>Pleurotus</i>	• Biodegradación enzimática (MnP, LiP, laccasa) • Biosorción y bioacumulación • Sistemas en biorreactores (ej.	• 86% decoloración de Reactive Blue-19 • 88% decoloración de Reactive Black-5 • Hasta 95% decoloración de

								<ul style="list-style-type: none"> <i>ostreatus</i> <i>Trametes versicolor</i> <i>Ganoderma lucidum</i> <i>Datronia sp.</i> <i>Cerrena unicolor</i> 	packed-bed, air-lift, fermentación en estado sólido) <ul style="list-style-type: none"> Micorremediación con hongos de podredumbre blanca 	Reactive Blue-4 en 1 día <ul style="list-style-type: none"> Casi 90–100% en algunos fármacos y disruptores endocrinos
Ladislao Ruiz; José Iannacone; Iván Tocto; Analiz Ruiz; Paradise Harirchian. (Iannacone, 2018)	2018	Dialnet	The Biologist (Lima)	Español	Perú	Azul Turquesa sintético	<ul style="list-style-type: none"> Lignina peroxidasa (LiP) Manganeso peroxidasa (MnP) Lacasa 	<i>Pleurotus ostreatus</i>	Se usaron biorreactores air-lift	<ul style="list-style-type: none"> A 100 mg/L → 76.93 % A 200 mg/L → 69.25 % A 400 mg/L → 84.76 %
Gómez Camila	2024	no es un artículo indexado en base de datos	No aplica	Español	Colombia (cepas aisladas en Medellín)	Colorante azoico • Rojo 40 (R40)	Manganeso peroxidasa	<ul style="list-style-type: none"> <i>Lentinus sp.</i> <i>Phanerochaete sp.</i> 	Uso de biorreactor estático operado en lote con biomasa fúngica inmovilizada en <i>Luffa cylindrica</i>	<ul style="list-style-type: none"> <i>Lentinus sp.</i>: hasta 73,3 % en 12 días (escala 1,5 L) <i>Lentinus sp.</i> (reactor 6 L): 52 % en 12 días con concentración inicial 80 mg/L <i>Phanerochaete sp.</i>: menor eficiencia (13–44 % según ensayo)
Juliana Osorio, Juan Carlos Quintero (Osorio & Quintero, 2018)	2018	SciELO	Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería	Español	Colombia (Universidad de Antioquia, Medellín)	Turquesa Erionyl	<ul style="list-style-type: none"> Lignina peroxidasa (LiP) Manganeso peroxidasa (MnP) Lacasa 	<i>Bjerkandera sp</i>	Cultivo sumergido en lote (batch) con agitación en matraces de 500 mL con medio Kirk + colorante	Entre 73 – 83 % en 8 días
John Fredy Holguín Múnera, Rocío del Pilar Monroy Rodríguez, Andrey Esneider Escobar Oquendo, Gloria Margely Muñoz Marín. (Vista de Degradación de Efluentes de Los Procesos de Teñido Con Colorantes Directos	2018	SciELO	Revista INNMODALA B	Español	Colombia	Directos • Tubantin Azul 2RL-200 • Tubantin Amarillo GR • Tubantin Rosa 2B.	<ul style="list-style-type: none"> Lignina peroxidasa (LiP) Manganeso peroxidasa (MnP) Lacasa 	<i>Phanerochaete chrysosporium.</i>	<ul style="list-style-type: none"> Degradación enzimática en medio líquido (sistema batch) En medio sólido, con inducción enzimática mediante agente elicitor (aserrín). 	<ul style="list-style-type: none"> Tubantin Azul 2RL-200: 65% Tubantin Amarillo GR: 48% Tubantin Rosa 2B: 91%.

<i>Empleando Métodos Biotecnológicos Innmoda Lab, n.d.)</i>										
Zamora-Quijije Sergio Miguel; Ponce-Bazurto Génesis Mabel; Rosero-Delgado Ernesto Alonso; Burgos-Briones Gabriel Alfonso (<i>Vista de Selección de Hongos Con Capacidad Degradativa de Colorantes Sintéticos, n.d.)</i>	2023	LATINDEX	Revista Científica INGENIAR	Español	Ecuador (Universidad Técnica de Manabí)	<ul style="list-style-type: none"> • Amarillo 5 (alimenticio) • Rojo 40 (farmacéutico) • Azul 19 (textil) 	Lacasa	<i>Pleurotus djamor</i>	Ensayo en placas con colorantes sintéticos + detección de enzima Lacasa mediante ABTS (biorremediación fúngica en condiciones de laboratorio)	<ul style="list-style-type: none"> • Azul 19: 51% por día • Rojo 40: 36% por día • Amarillo 5: 8% por día
Juliana Guzmán (Guzmán et al., n.d.)	2023	No se encuentra indexada en base de datos. Repositorio institucional Universidad Distrital Francisco José de Caldas	no revista científica	Español	Colombia en Bogotá D.C	Cristal Violeta	<ul style="list-style-type: none"> • Lignina peroxidasa (LiP) • Manganeso peroxidasa (MnP) • Lacasa 	<i>Trametes versicolor</i>	Biodegradación en biorreactor de columna de burbujeo (cultivo líquido con aireación)	Hasta 90 % de remoción de colorante
Martín Fernández Garrote (Fernández Garrote, n.d.)	2020	PubMed	No aplica	Español	España	<ul style="list-style-type: none"> Azoicos • Reactive Black 5 • Congo Red • Orange II • Remazol Brilliant Blue R 	<ul style="list-style-type: none"> • Peroxidasa • Lacasa 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Trametes versicolor</i> • <i>Cunninghamella elegans</i> • <i>Polyporus sp.</i> • <i>Irpex lacteus</i> • <i>Aspergillus terreus</i> • <i>Bjerkandera sp.</i> • <i>Pleurotus sajor-caju</i> • <i>Phanerochaete chrysosporium</i> • <i>P. sordida</i> 	Biorreactores con hongos ligninolíticos inmovilizados (discos rotatorios, lecho fijo, tambor giratorio, etc.)	Entre 60% y 99.5%

Astrid Stefanía Duarte Trujillo, Javier Alexander Jiménez Forero, Julio Amilcar Pineda Insuasti, Elsa Sulay Mora Muñoz	2019	No aplica	Biorrefinería	Español	Colombia y Ecuador	Índigo carmín	<ul style="list-style-type: none"> Lacasas Manganeso peroxidadas (MnP) Lignin-peroxidadas (LiP) Versátil-peroxidadas 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Trametes hirsuta</i> (82–100% decoloración) <i>Coriopsis rigida</i> (100% en 4h) <i>Ceriporiopsis subvermispota</i> (>95%) <i>Phanerochaete chrysosporium</i> (75–90, 18%) <i>Pleurotus ostreatus</i> (99%) <i>Trametes versicolor</i> (100%) <i>Piptoporus betulinus</i> (100%) 	<ul style="list-style-type: none"> Uso de hongos de pudrición blanca en fermentación sólida, líquida, inmovilizados en diferentes soportes (esponja de acero, perlas de alginato, semillas de uva, cáscaras de cebada, residuos agrícolas). Aplicación de enzimas aisladas (lacasas, peroxidadas) en reactores y bioreactores. 	75% – 100% según hongo, técnica y condiciones
Belén Nicole Leiva Añorga (Stefanía et al., n.d.)	2022	Science Direct	No aplica directamente	Español	Perú	Azoicos	<ul style="list-style-type: none"> Lacasas Manganeso peroxidadas (MnP) Lignina peroxidadas (LiP) 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Phanerochaete chrysosporium</i> <i>Pleurotus ostreatus</i> <i>Trametes hirsuta</i> 	Micorremediación / biodegradación de efluentes textiles mediante cultivos de hongos ligninolíticos, incluyendo co-cultivos y uso en biorreactores	<ul style="list-style-type: none"> <i>P. ostreatus</i> <i>P. chrysosporium</i> <p>alcanzaron porcentajes superiores al 90%</p>
Jaqueline Chávez García (Ambiental et al., 2023)	2023	No se encuentra indexada en base de datos. Universidad Autónoma del Estado de Morelos (repositorio institucional)	No aplica directamente	Español	México	Rojo Congo	Lacasa	<i>Trametes versicolor</i>	<ul style="list-style-type: none"> Cultivo en agar y en líquido con medios HIT, M17 y M24 (con y sin CuSO₄). Evaluación de degradación mediante biosorción y actividad enzimática de lacasas. 	<ul style="list-style-type: none"> 90% en medio M17 a 125 ppm. Entre 44% y 70% a 250 ppm (dependiendo del medio). Entre 6% y 77% a 500 ppm (dependiendo del medio). El mayor porcentaje fue 85–86% en medio M24 con CuSO₄.
Roberto González; Roberto Villagómez; Alfredo Madariaga; Javier Castro; César González (Roberto et al., n.d.)	2019	No se menciona específicamente	Revista Iberoamericana de Ciencias	Español	México	<ul style="list-style-type: none"> Colorantes azoicos Reactivos Acidos Colorantes dispersos Colorantes sulfonados Colorantes 	<ul style="list-style-type: none"> Lacasas Peroxidasas de manganeso (Mn-peroxidadas) Lignina peroxidadas Reductasas 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Pleurotus ostreatus</i> <i>Coriopsis gallica</i> <i>Pycnoporus sanguineus</i> <i>Trametes versicolor</i> <i>Phelebia radiata</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Uso de consorcios biológicos diseñados (co-cultivo de hongos/hongos, hongos/levaduras, hongos/bacterias) para mejorar la producción de enzimas y la decoloración/ 	<ul style="list-style-type: none"> 100% decoloración para ciertos colorantes con consorcios en 2 h 90% en 3 min para ciertos colorantes con lacasas + mediador

						derivados de industria textil	<ul style="list-style-type: none"> • azoicas • Tirosinasa • NADH-DCIP reductasa • Alcohol oxidasa 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Ceriporiopsis subvemispota</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • biodegradación de colorantes. • También técnicas como inmovilización de células o enzimas, uso de mediadores, enzimas purificadas, extractos enzimáticos. 	<ul style="list-style-type: none"> • 97% de decoloración del efluente textil con eliminación de DBO y DQO 	
María de la Luz Angélica Vallejo Aguilar	2021	No se encuentra indexada en base de datos. Repositorio académico (BUAP – Instituto de Ciencias, ICUAP)	No aplica	Español	México	Azoico	<ul style="list-style-type: none"> • Rojo Directo 23 	Lacasa	<i>Pleurotus ostreatus</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Micorremediación enzimática (lacasa) + biosorción con biomasa residual y biofiltro 	<ul style="list-style-type: none"> • Hasta 94.4% de decoloración/mineralización en 14 días
L.N. Carolina Martínez Berra (Maestra & Biotecnología, 2019)	2019	No se encuentra indexada en base de datos. Repositorio académico (Universidad Autónoma de Tlaxcala)	No aplica	Español	México	<ul style="list-style-type: none"> • Azoicos • Coralene golden yellow • Coralene azul marino • Coralene rojo oscuro • Everdirect azul 4BL • Negro reactivo 5 	<ul style="list-style-type: none"> • Lacasas • Manganeso peroxidasa (MnP) • Lignina peroxidasa (LiP) • " 	<i>Pleurotus ostreatus</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fermentación líquida • Micelio inmovilizado en soportes (luffa, poliuretano) • Matriz miceliar en sustrato sólido • Cultivo sumergido 	<ul style="list-style-type: none"> • Entre 53% en 8 h (everdirect azul 4BL) • 96–98% en 4 días (negro reactivo 5) • 88–98% según el colorante y especie 	
Apoorva Deshmukh, Parnal Sattikar, Aishwarya Sukhatankar, Geetanjali Wakade, Pramod Kumbhar, Phaneeswara-Rao Kommoju. (Deshmukh et al., 2026)	2025	ScienceDirect	Protein Expression and Purification	Inglés.	India	<ul style="list-style-type: none"> • Índigo carmín • Azul brillante Remazol 	Lacasa	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pleurotus ostreatus</i> • <i>Trametes versicolor</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Fermentación sumergida para producir lacasas y aplicación en decoloración de efluentes industriales. 	<ul style="list-style-type: none"> • 70% (índigo carmín) • 74% (azul brillante Remazol) 	
Yitong Jia, Qianqian Huang,	2022	PubMed	Molecules	Inglés.	China	<ul style="list-style-type: none"> • Remazol Brilliant Blue R (RBBR, 	Lacasa	<i>Trametes hirsuta</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Expresión heteróloga de lacasa en <i>Pichia pastoris</i> y aplicación en 	<ul style="list-style-type: none"> • RBBR: 92.6% (sin mediador) y 99.2% (con mediador) 	

Lanlan Zhu, Chengyuan Pan (Jia et al., 2022)						<p>antraquinona)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Acid Red 1 (AR1, azo) • Crystal Violet (CV, trifenilmetano) • Neutral Red (NR, heterocíclico) 			decoloración enzimática (con y sin mediador ABTS)	<p>ABTS)</p> <ul style="list-style-type: none"> • AR1: 15.3% → 67.1% • CV: 14.2% → 38.9% • NR: 12.3% → 52.3%
Seri Amelie Mulyadi, Tengku Elida Tengku Zainal Mulok, Noor Hana Hussain, Rohana Mat Nor (Mulyadi et al., 2022)	2022	Scopus	Journal of Sustainability Science and Management	Inglés.	Malasia	Reactivos y ácidos	<ul style="list-style-type: none"> • Lacasas • Manganeso peroxidasas (MnP) • Lignina peroxidasas (LiP) 	<i>Pleurotus pulmonarius</i>	Cultivo en shake flask fermentation (fermentación en matraces agitados) para tratar aguas residuales textiles	Máximo 59.45% tras 144 horas
Christian Zafiu, Seta Küpcü, Mika A. Kähkönen (Zafiu et al., 2022)	2022	ScienceDirect	MethodsX	Inglés.	Austria	<p>Colorantes reactivos textiles</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reactive Black 5 • Reactive Blue 4 • Reactive Green 19 • Reactive Orange 16 	<ul style="list-style-type: none"> • Lacasas • Manganeso peroxidasas (MnP) • Lignina peroxidasas (LiP) 	<i>Phanerochaete velutina</i>	Ensayos colorimétricos en microplacas (screening en laboratorio) con controles para separar la decoloración enzimática, no enzimática y la interferencia de metabolitos.	<ul style="list-style-type: none"> • RB4: más rápida, vida media \3.8 días (enzimática 5.8 días) • RB5: vida media \4.6 días (enzimática 6.8 días) • RO16: vida media \14.3 días (enzimática 24.4 días) • RG19: mínima decoloración, vida media \33.5 días (enzimática 64.7 días)
Yali Zhang, Tingting Shi, Zhen He, Binbin Li, Zhongqi Guo, Junling Zhang, Hongwei Bai, Hongxing Wang (Giap et al., 2022)	2022	Scopus	Bioresource Technology Reports	Inglés.	China	<p>Azo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reactive Black 5 (RB5) 	Lacasas	<i>Trametes versicolor</i>	Uso de gránulos fúngicos inmovilizados (fungal pellets) de <i>T. versicolor</i> en tratamiento de aguas residuales sintéticas con RB5	Hasta 91.2% decoloración de RB5 en 96 h bajo condiciones óptimas
Mariana E. Molina-Guerrero, Ana M. Arana-Cuenca, Sebastián S. Arias	2019	Scopus	Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad	Español	Argentina	<p>Azo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rojo Congo 	Lacasas	<i>Trametes versicolor</i>	Ensayos en medio líquido con el hongo en cultivo sumergido para evaluar la decoloración del tinte	95% decoloración de Rojo Congo en 10 días

(Laksmi et al., 2021)			Nacional de Cuyo							
Felipe Mejía-Otálvaro, Andrés Merino-Restrepo, Angelina Hormaza-Anaguano (Mejía-Otálvaro et al., 2021)	2021	Scopus	Journal of Environmental Management	Inglés.	Colombia	Rojo Allura AC	Lacasas	<i>Trametes pubescens</i>	Tratamiento enzimático in vitro con lacasa concentrada (sin mediadores sintéticos) + inmovilización en perlas de alginato de calcio.	<ul style="list-style-type: none"> • Lacasa libre concentrada: 68,4 % • Lacasa inmovilizada: 4,6 %
Ge, Mingrui; Deng, Wei; Wang, Ziyi; Weng, Chenwen; Yang, Yang (Ge et al., 2024)	2024	Pubmed	Molecules	Inglés.	China	<ul style="list-style-type: none"> • Azo • Anthraquinone • Triphenylmethane • Índigo 	Lacasas	<i>Pleurotus eryngii</i>	Tratamiento in vitro con extracto crudo de lacasa, aplicando la enzima directamente sobre los colorantes (soluciones), tanto para tintes individuales como mezclas; además se evalúa la detoxificación y repetición de lotes	Los colorantes individuales y mixtos la decoloración supera el 80-90 % en 24 h

A partir de los artículos seleccionados los colorantes reportados con mayor frecuencia se relacionan en la **tabla 3** siendo los más predominantes los pertenecientes a los grupos azoico y trifenilmetano.

Tabla 3. Clasificación de los colorantes azoicos con su respectiva aplicación

AZOICO	APLICACIÓN
Rojo Congo	Directo
Orange II	Ácido
Methyl Orange	Ácido (indicador)
Rojo Directo 23	Directo
Rojo 40 (Allura Red AC)	Alimentario
Amaranth	Alimentario
Rojo 8-BLP	Ácido
Acid Red 1 (AR1)	Ácido
Acid Red 44	Ácido
Reactive Red 120	Reactivo
Reactive Red 198	Reactivo
Direct Red 81	Directo
Reactive Orange 16	Reactivo
Reactive Yellow 176	Reactivo
Direct Yellow 11	Directo
Acid Orange 7	Ácido
Reactive Black 5 (RB5)	Reactivo
Direct Black 80	Directo
Reactive Green 19	Reactivo
Poly R-478	polimérico, indicador textil
Tubantín Azul 2RL-200	Directo
Tubantín Amarillo GR	Directo
Tubantín Rosa 2B	Directo
Coralene azul marino	Directo
Coralene rojo oscuro	Directo
Everdirect azul 4BL	Directo
Trypan Blue	Directo
TRIFENILMETANO	APLICACIÓN
Verde Malaquita	Básico (catiónico)
Methylene Blue	Básico (catiónico)
Crystal Violet	Básico (catiónico)
Brilliant Green	Básico (catiónico)
Victoria Blue R	Básico (catiónico)
Methyl Green	Básico (catiónico)
Azure B	Básico (catiónico)
Acid Green 27	Ácido
ANTRAQUINONA	APLICACIÓN

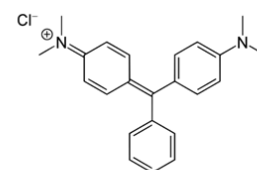
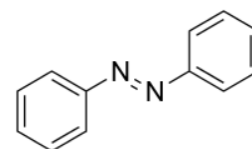
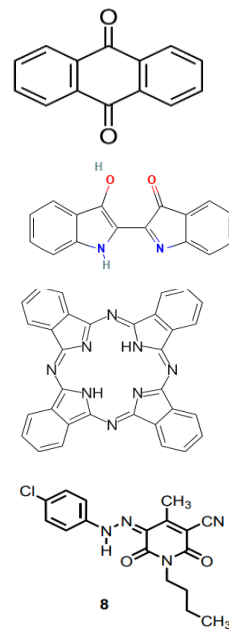


Figura 12 Estructura molecular verde de malaquita.

Remazol Brilliant Blue R)	Reactivo
Acid Blue 129 (AB129)	Ácido
Cibacet Brilliant Blue	Reactivo
Anthraquinone (genérico)	Reactivo - Ácido
ÍNDIGOIDE	APLICACIÓN
Indigo Carmine (Acid Blue 74)	Ácido
Índigo	Vat (de cuba)
Indigo Blue	Vat (de cuba)
FTALOCIANINAS	APLICACIÓN
Ftalocianinas	Directos-Reactivos
Azul Turquesa	Directos-Reactivos
HETEROCICLICO	APLICACIÓN
Neutral Red	Básico (catiónico)



Se realizó un mapa de coocurrencia mediante VOSviewer, en el que se representan las relaciones entre las revistas y las bases de datos en las que se localizan indexados los artículos analizados. Cada nodo corresponde a una fuente (base de datos o revistas) y los enlaces indican la frecuencia de coincidencias o vínculos entre ellas.

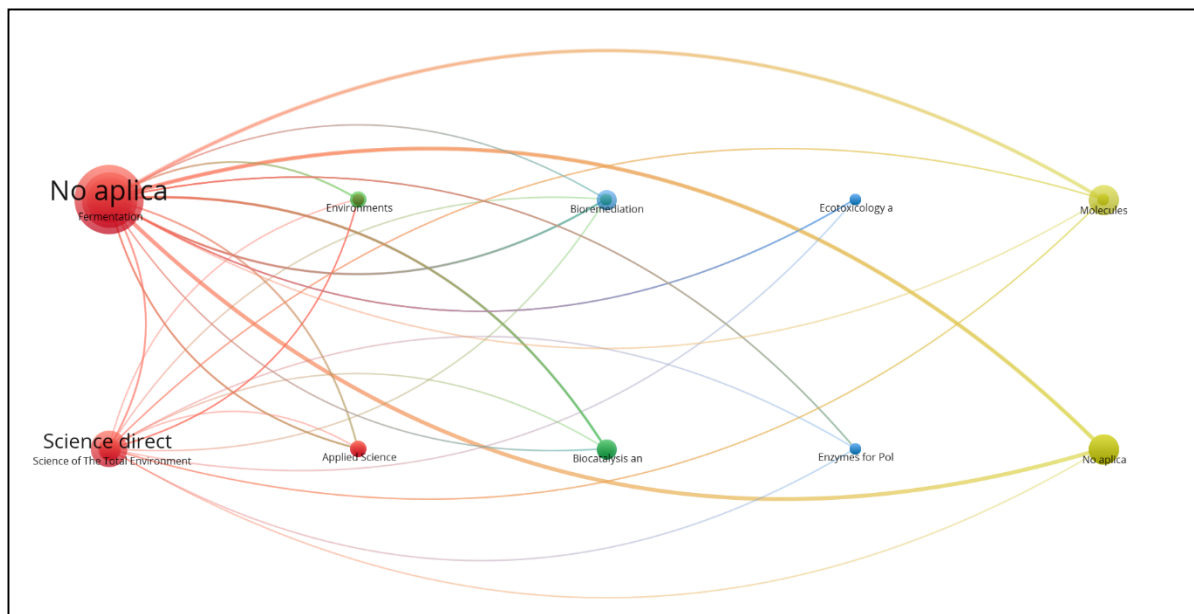


Figura 2. Mapa de coocurrencia entre base de datos y revistas.

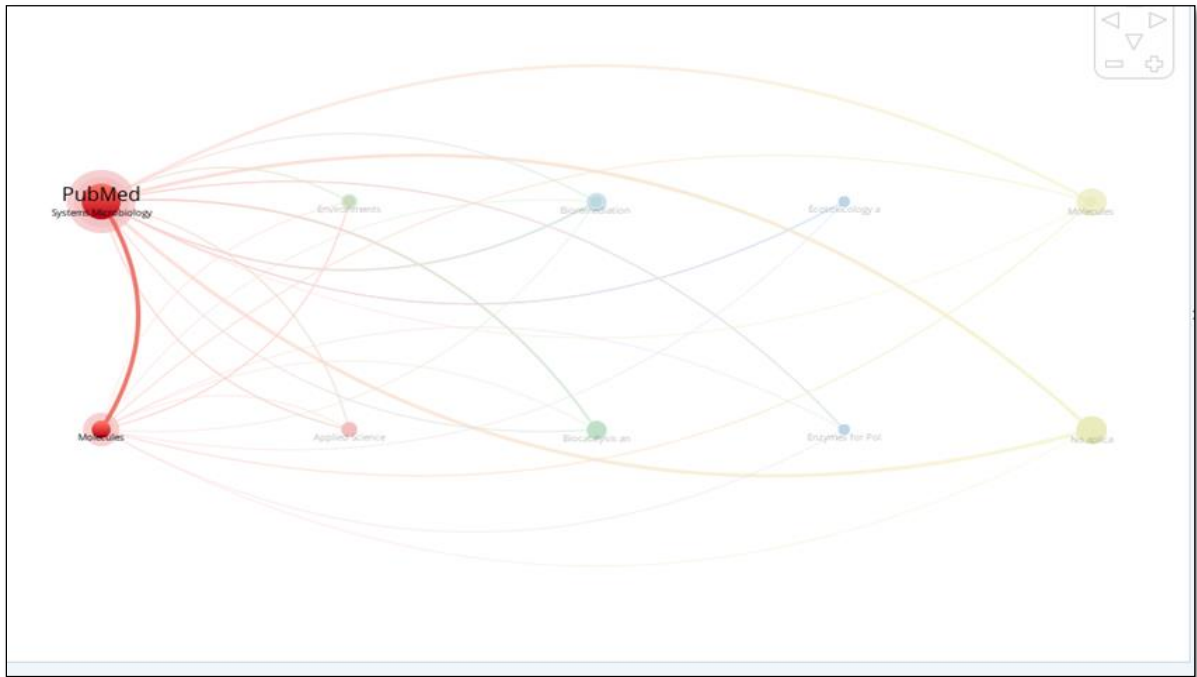


Figura 3. Mapa de coocurrencia entre la base de datos Pubmed y las revistas asociadas a los artículos analizados.

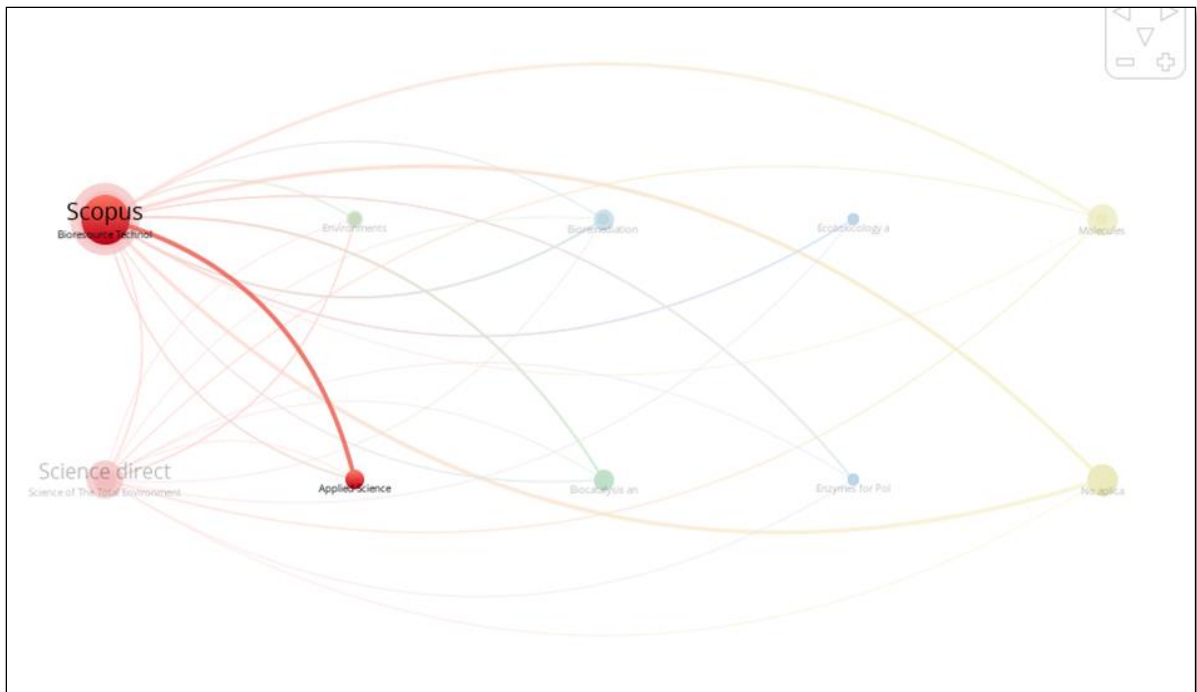


Figura 4. Mapa de coocurrencia entre la base de datos Scopus y las revistas asociadas a los artículos analizados.

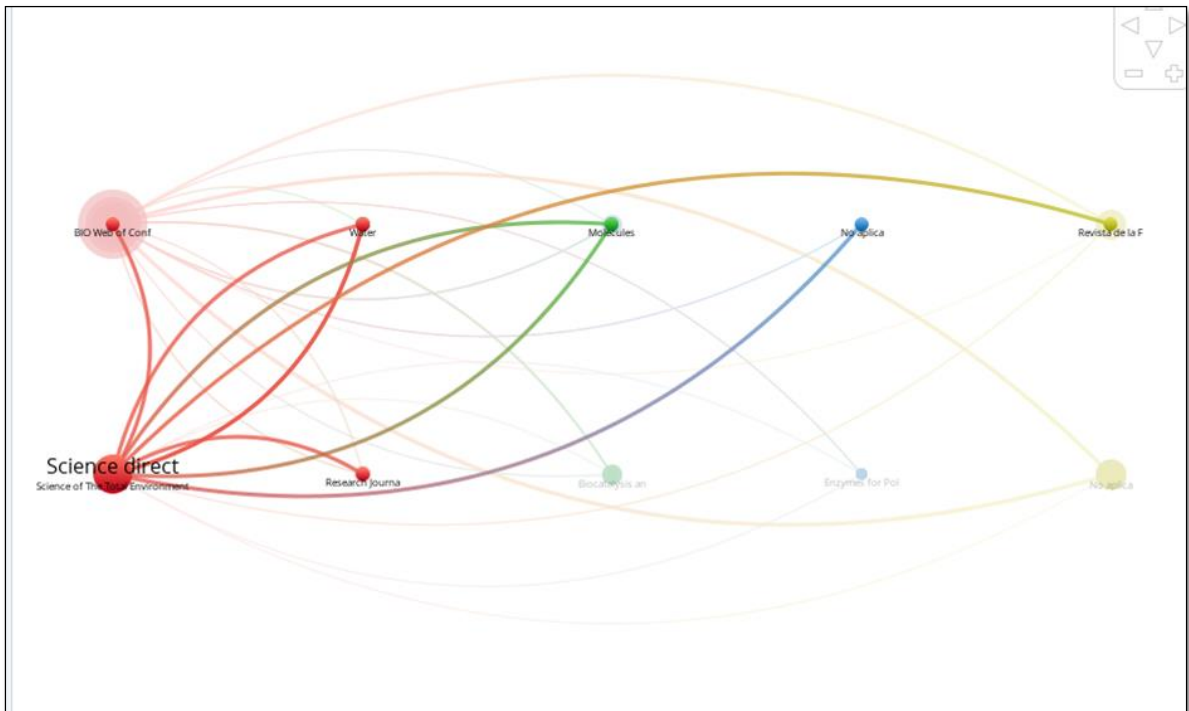


Figura 5. Mapa de coocurrencia entre la base de datos Science direct y las revistas asociadas a los artículos analizados.

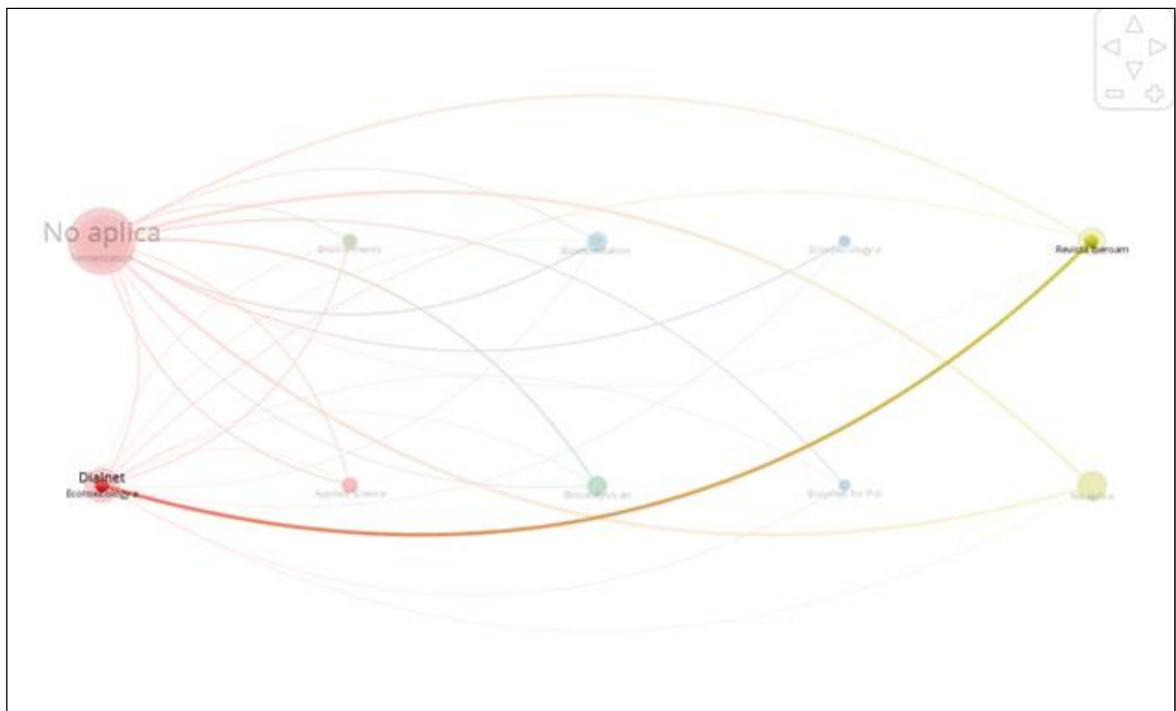


Figura 6. Mapa de coocurrencia entre la base de datos Dialnet y las revistas asociadas a los artículos analizados.

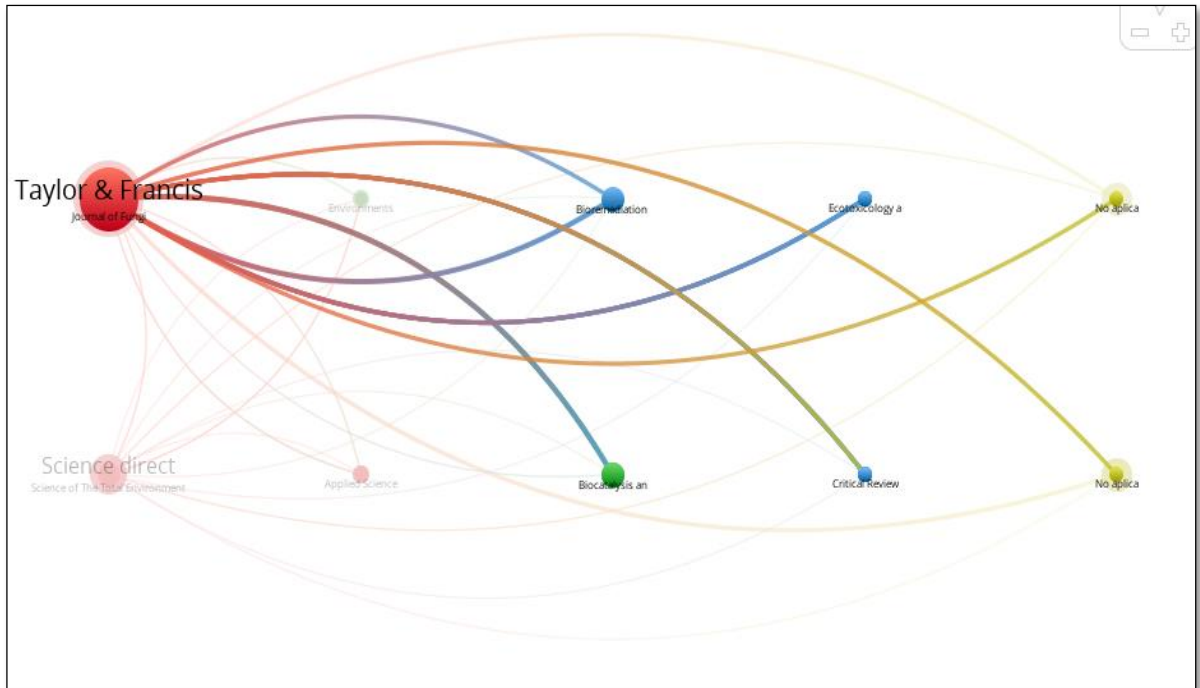


Figura 7. Mapa de coocurrencia entre la base de datos Taylor y Francis y las revistas asociadas a los artículos analizados.

La distribución geográfica de los artículos seleccionados arrojó un total de 21 países que reportaron hongos de podredumbre blanca biorremediadores de colorantes textiles, distribuidos de la siguiente manera: India con 12 artículos, Colombia con ocho, China con siete, México con cinco; Brasil con cuatro; Indonesia, Italia y Pakistán con tres cada uno; Austria, España, Malasia, Turquía, Sri Lanka y Perú con dos cada uno; y Argentina, Bangladesh, Ecuador, Finlandia, Japón y Letonia con uno cada uno (**Figura 8**).

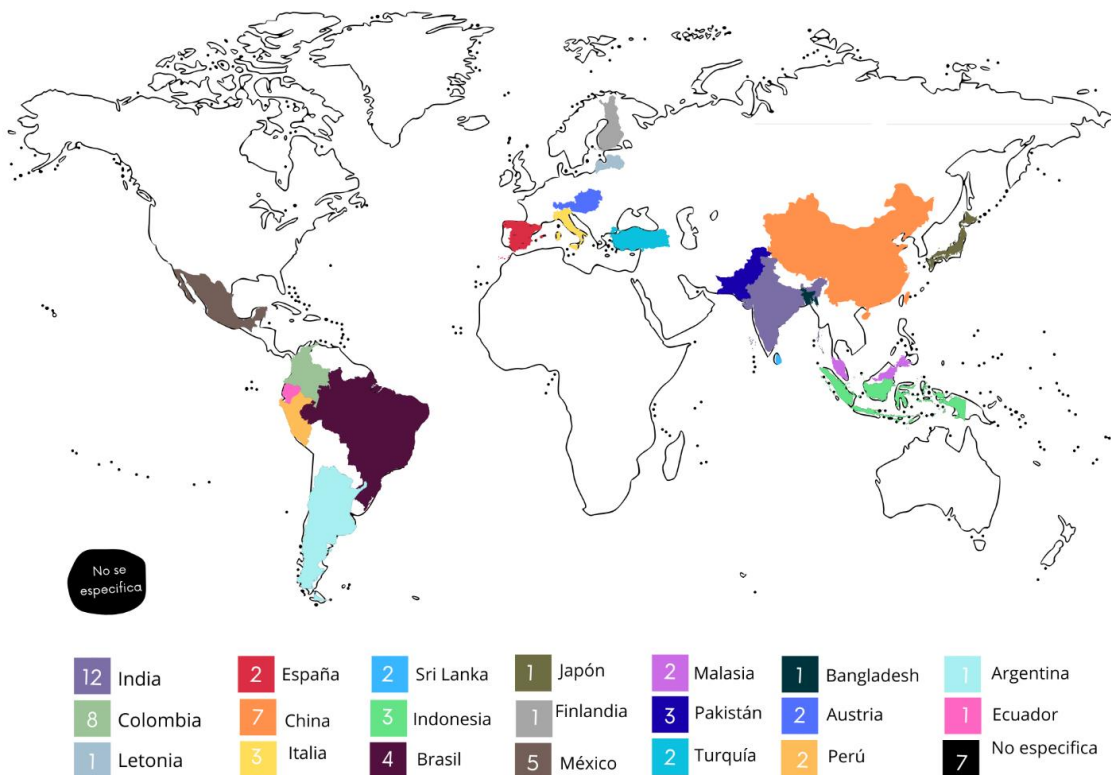


Figura 8. Distribución geográfica de los artículos seleccionados

En el análisis de la frecuencia de publicación por año de los artículos seleccionados en los países. Se evidencia que entre 2018 a 2020, se tuvo una frecuencia de publicación baja y dispersa. Sin embargo, a partir del 2021, se observa un incremento progresivo en la cantidad de artículos, con picos notables en 2024 y 2025. (Figura 9.)

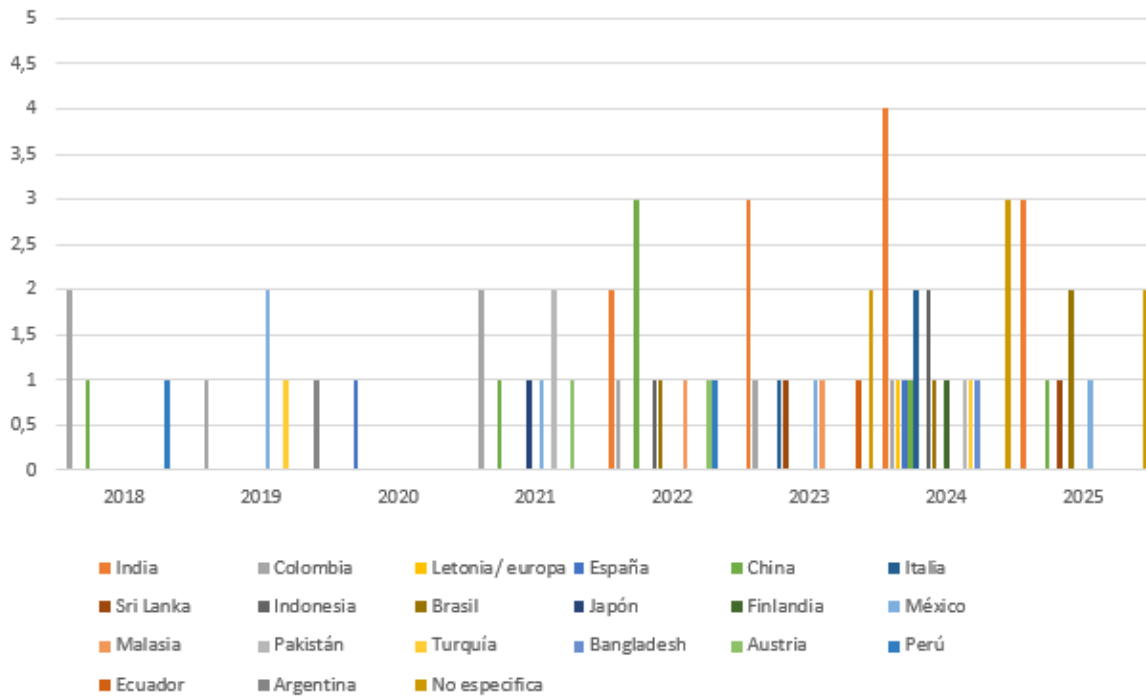


Figura 9. Frecuencia de publicación por año de los artículos seleccionados en cada país.

La figura 10 se observa la distribución de las especies de los hongos más utilizados en los estudios analizados. Se identifican que *Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus* y *Phanerochaete chrysosporium* son los más empleados, mientras que otras especies presentan una frecuencia menor.

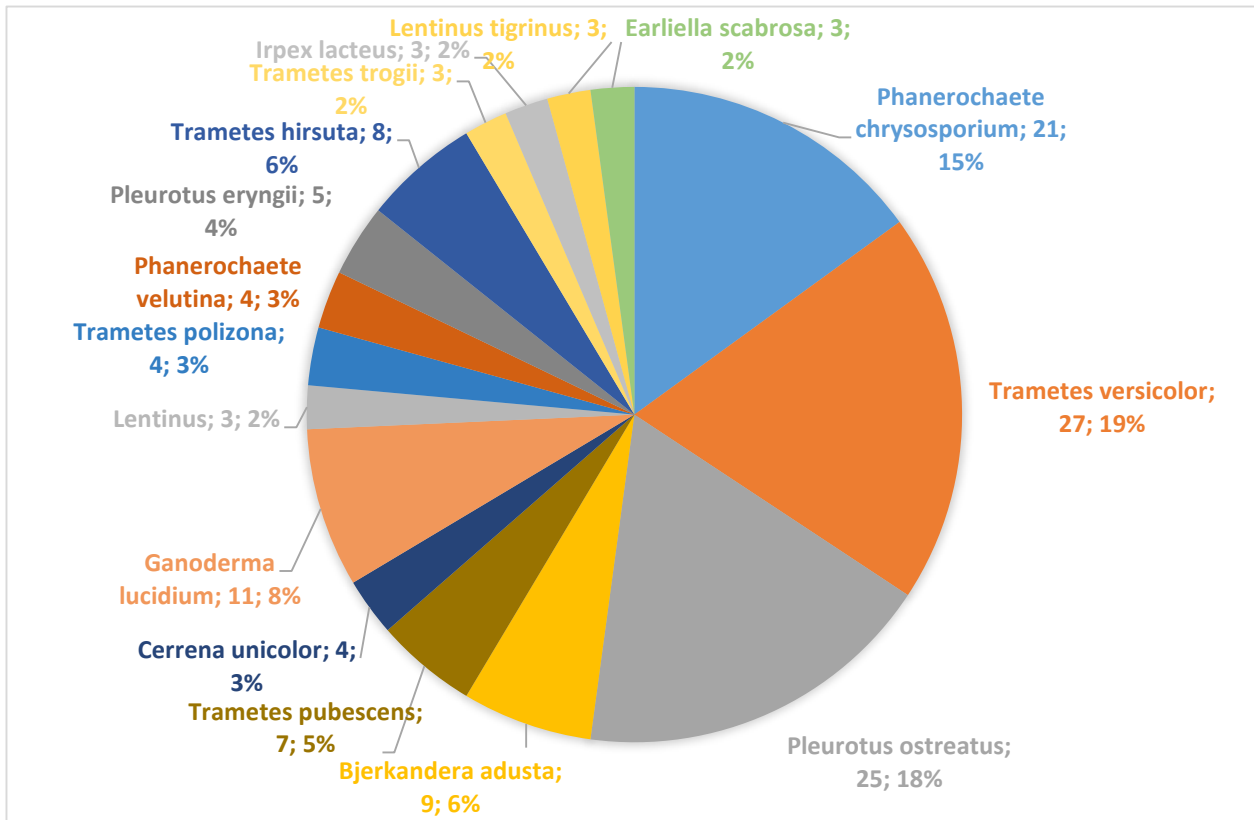


Figura 9. Frecuencia de Hongos de podredumbre blanca que se emplearon en la revisión.

Se registran qué enzimas fueron empleadas por los hongos de podredumbre blanca para la remoción de los colorantes, destacándose la Lacasa como la más utilizada, seguida por la Lignina peroxidasa y manganeso peroxidasa.

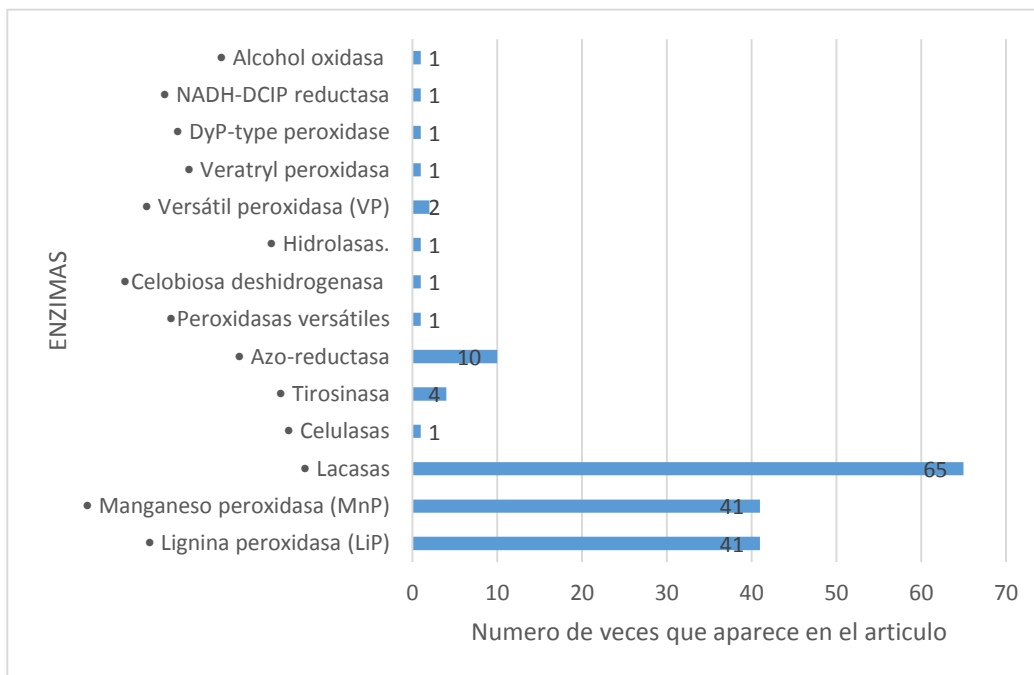


Figura 10. Distribución de las enzimas utilizadas en la remoción de colorantes por Hongos de podredumbre blanca

Se presentan las técnicas de biorremediación empleadas para la remoción de colorantes mediante hongos de podredumbre blanca. En la gráfica se muestra la frecuencia con la que cada técnica fue reportada en los artículos revisados, incluyendo el uso de lacasas y ensayos de decoloración entre otras estrategias utilizadas.

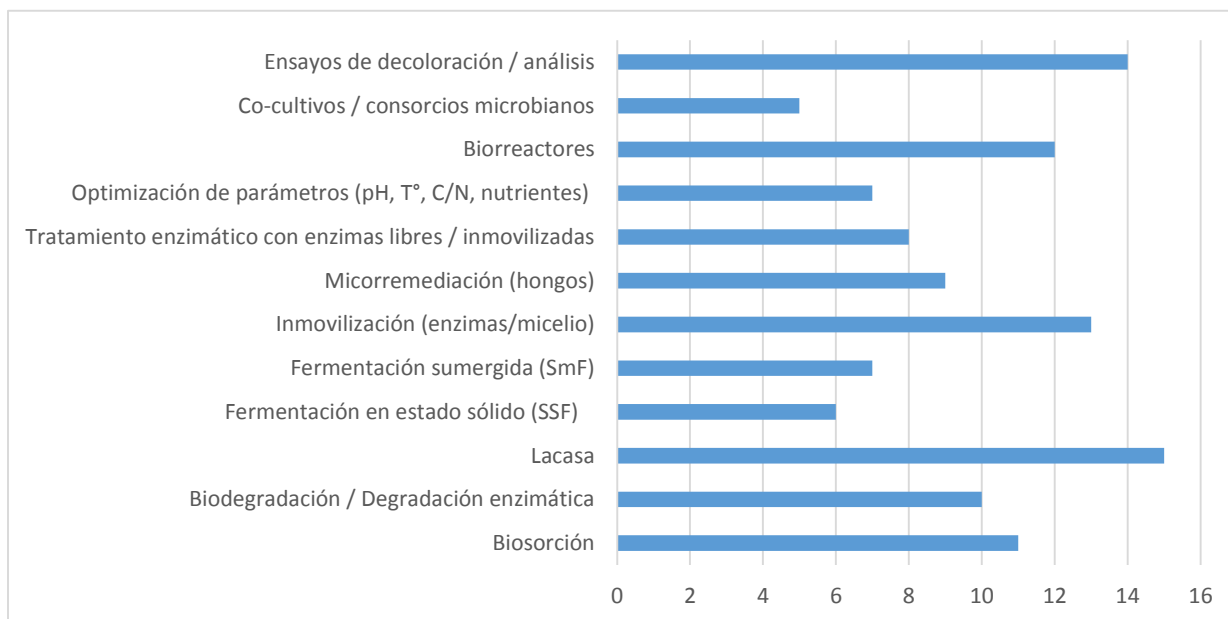
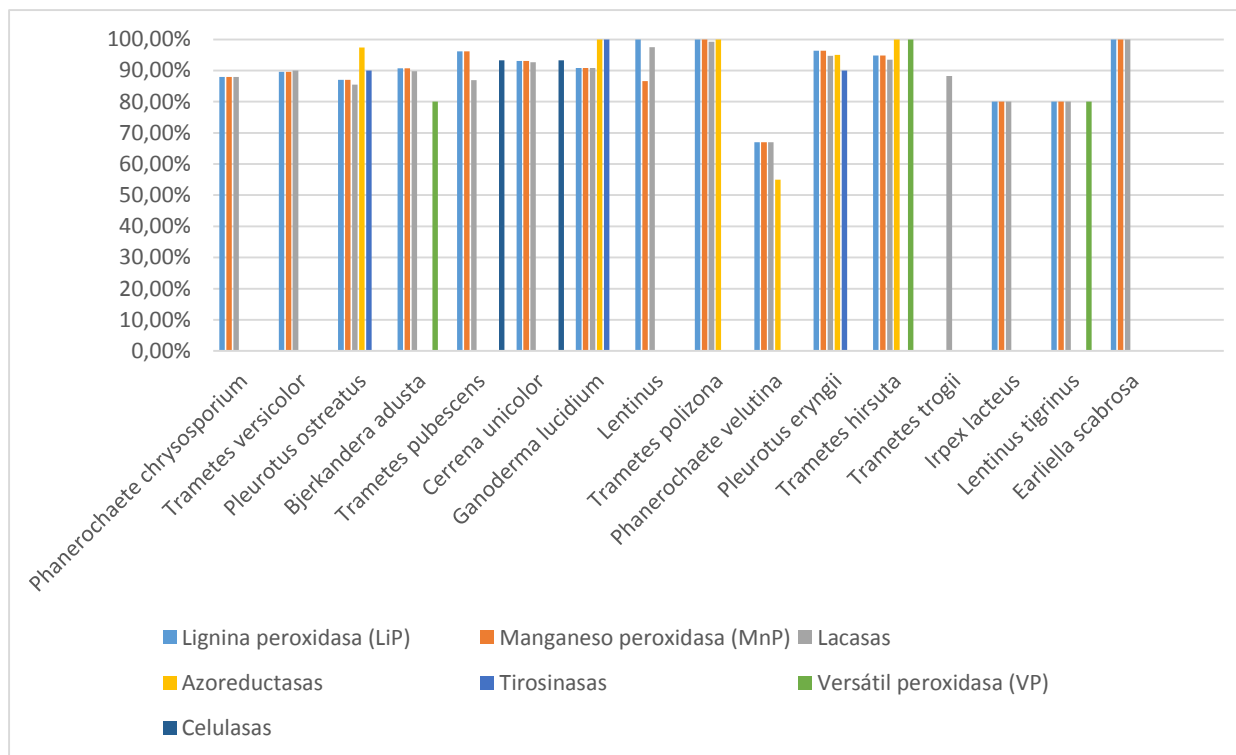


Figura 11. Técnicas de biorremediación aplicadas en la remoción de colorantes por Hongos de podredumbre blanca

Se presentan los resultados relacionados con la eficiencia enzimática de diferentes especies de hongos de podredumbre blanca frente a la remoción de colorantes. La gráfica compara la participación de diversas enzimas, como lignina peroxidasa, manganeso peroxidasa, lacasas y otras, evidenciando los niveles de eficiencia alcanzados en cada especie analizada.



Se muestran los datos de eficiencia de decoloración en conjunto con el número de reportes de hongos utilizados en los estudios. Esta gráfica permite visualizar la relación entre la frecuencia de uso de cada hongo y la eficiencia obtenida en los procesos de decoloración de colorantes.

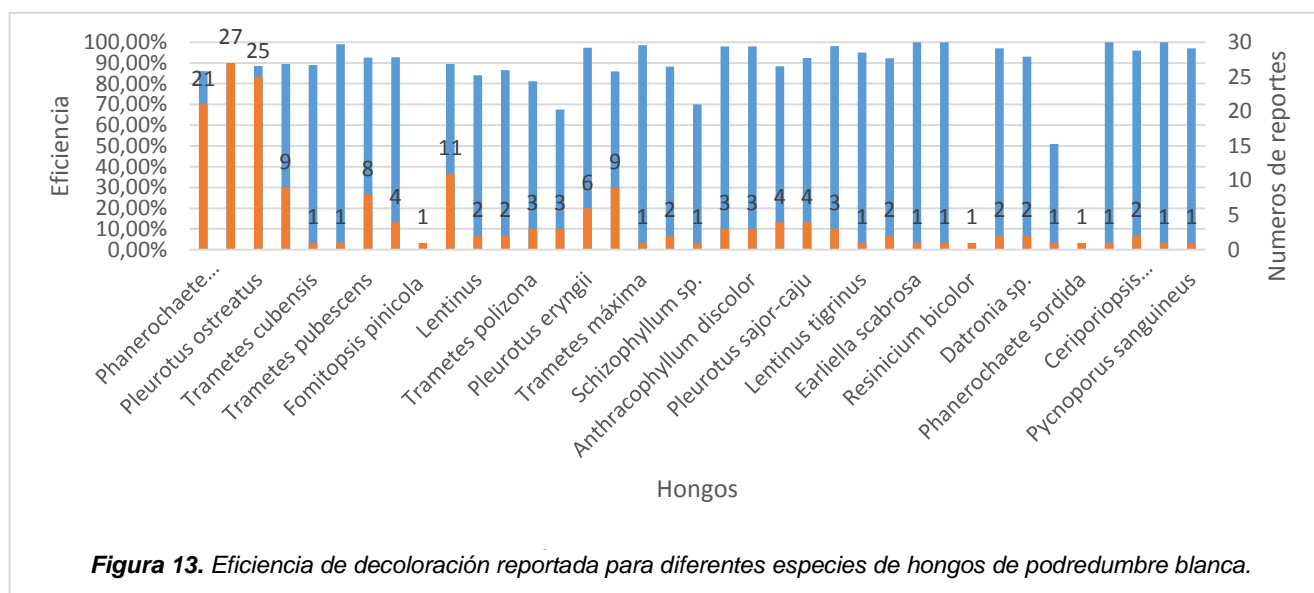


Figura 13. Eficiencia de decoloración reportada para diferentes especies de hongos de podredumbre blanca.

4. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Se creó una matriz comparativa que recopila los estudios seleccionados con el objetivo de integrar y examinar la información disponible en la literatura. Esta tarea de síntesis posibilita no solo la recopilación de los datos más significativos reportados en cada estudio, sino también el establecimiento de un punto de partida para entender cómo se han empleado los hongos de podredumbre blanca en la biorremediación de colorantes textiles, cuáles especies han sido objeto del mayor número de investigaciones y qué enfoques metodológicos son más comunes en este campo.

La **Tabla 2** resume los hallazgos de los artículos analizados, con las especies de hongos empleada, año del estudio, los autores, las enzimas reportadas, las técnicas utilizadas y los niveles de eficiencia logrados. Esta comparación permite observar la variedad de perspectivas utilizadas y muestra la relación entre las características biológicas de cada especie y los porcentajes de remoción reportados, lo cual es un recurso valioso para detectar patrones y guiar investigaciones futuras.

Las **Figuras 2–7** muestran la conexión entre las revistas donde se publicaron los artículos analizados y las bases de datos principales que fueron consultadas (NCBI, Scopus, PubMed y Science Direct). En todos los escenarios, las bases de datos se constituyen como nodos clave con numerosas conexiones hacia diversas revistas, lo que demuestra su función como repositorios esenciales en la literatura científica vinculada a la biorremediación de tintes textiles por medio de hongos de podredumbre blanca. Además, la categoría "No aplica" concentró una cantidad significativa de conexiones, lo que indica que algunos de los artículos utilizados fueron recuperados de forma independiente y no necesariamente asociados directamente con una base de datos específica; sin embargo, también brindan información útil a la discusión general. (Jan van Eck & Waltman, 2022)

Entre las fuentes analizadas las que más reportan sobre la biodegradación de colorantes con hongos fueron PubMed, Science Direct y Scopus debido a que tienen una mayor densidad de vínculos, lo cual demuestra su importancia como repositorios principales. Este modelo de distribución evidencia que el estudio acerca de la degradación de colorantes textiles está muy extendido en revistas interdisciplinarias y con acceso internacional, lo cual enfatiza la importancia de tratar este asunto desde varias áreas, como son las ciencias ambientales, las ciencias químicas, la biotecnología y la microbiología. Así, se muestra que el interés en el tema ha superado los límites de las disciplinas y se ha vuelto un eje fundamental de las investigaciones ambientales a nivel global.

Los colorantes textiles es un problema medio ambiental de gran relevancia debido a que la industria textil es uno de los mayores responsables de la contaminación del agua en todo el mundo. Se calcula que una fábrica textil de tamaño medio utiliza cerca de 1,6 millones de litros de agua diariamente para producir 8000 kg de tela, lo que resulta en millones de galones de residuos. Estas descargas contienen una gran cantidad de sales, colorantes y elementos tóxicos que son difíciles de descomponer. Los colorantes, aun en concentraciones bajas, pueden ser mutagénicos, carcinogénicos y tóxicos; por eso su tratamiento inadecuado es una de las vías más importantes a través de las cuales contaminantes dañinos entran a los cuerpos naturales de agua. (Costa et al., 2025)

La complejidad estructural de los colorantes textiles les proporciona una resistencia y estabilidad elevadas ante los procesos de degradación en agua y en tierra, lo que hace más difícil su eliminación y extiende su permanencia ambiental. Esto ayuda a alterar parámetros esenciales de la calidad del agua, como la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y la DQO (demanda química de oxígeno), lo que causa que los niveles de oxígeno disuelto se reduzcan y origina condiciones anóxicas o hipóxicas que perjudican seriamente la vida acuática. Además, su efecto se extiende más allá de los medios acuáticos, ya que en ecosistemas marinos y de agua dulce los colorantes tienen la capacidad de impedir que la luz solar penetre, lo cual inhibe la fotosíntesis tanto de las plantas como de las algas, provocando efectos en cadena sobre la red trófica. La acumulación de estos compuestos en terrenos agrícolas puede modificar la fertilidad y restringir que las plantas absorban nutrientes fundamentales, lo que impacta procesos como el crecimiento y la germinación. Desde el punto de vista sanitario y biológico, se han registrado efectos citotóxicos, carcinogénicos, fitotóxicos y mutagénicos, que podrían presentarse como alergias, dermatitis o cambios en los genes, así como una mayor frecuencia de cáncer entre las poblaciones humanas expuestas. (Kusumlata et al., 2024)

Seis familias de colorantes fueron estudiadas en los artículos revisados: las heterocíclicas, las ftalocianinas, las indigoides, las antraquinonas, las trifenilmetanas y las azoicas. Cada una tiene propiedades químicas únicas que determinan su estabilidad, su utilización en la industria y qué tan difícil es degradarlas. Los colorantes azoicos (**Tabla 3**) son uno de los grupos químicos más usados. Tienen uno o más enlaces $-N=N-$ que les dan un amplio espectro cromático. La resonancia electrónica entre los anillos aromáticos posibilita que estos absorban la luz visible, lo cual es clave para su función como colorantes. Esta resonancia es el motivo por el que los colorantes azoicos tienen colores tan variados e intensos, que oscilan entre matices naranja y amarillo y otros más profundos, como azules oscuros y rojos. Respecto a su degradación, los colorantes azoicos plantean importantes retos por su estabilidad química. (Benkhaya et al., 2020)

Los colorantes antraquinónicos, tienen una alta resistencia. Estos se aplican en tonos verdes y azules. La antraquinona tiene una estructura molecular compuesta por un núcleo con tres anillos aromáticos fusionados, al cual se le han incorporado grupos funcionales que pueden ser diferentes dependiendo del tipo concreto de colorante. (Koblitz, 1988) Los colorantes antraquinona son más duraderos que otros tipos de colorantes, en cuanto a degradación se refiere. La antraquinona tiene una estructura firme, lo que hace que los procesos de degradación sean menos efectivos y, en consecuencia, más lentos. (Sen et al., 2023)

los trifenilmetanos, que poseen estructuras aromáticas voluminosas; su fórmula química elemental es $(C_6H_5)_3CH$, siendo un compuesto sólido de uso frecuente en la industria. (Ogugbue & Sawidis, 2011)

Por otro lado, los indigoides, como el índigo usado para hacer jeans, tienen una estructura molecular que les da estabilidad y resistencia al lavado. La estructura química del índigo, que es un derivado de la indigotina, posibilita que absorba luz en el espectro visible, lo cual hace que se muestre su color azul característico. La degradación de la indigotina ocurre primordialmente mediante procesos de reducción y oxidación, lo que hace más fácil su eliminación en condiciones controladas. No obstante, en relación con la degradación del medio ambiente, el índigo es más duradero que otros colorantes por su estabilidad química, lo cual supone retos para su procesamiento en ambientes naturales. (Harriman, 2025)

Las ftalocianinas, que son compuestos macrocíclicos con tonos vibrantes y una gran estabilidad química. La estabilidad térmica y la resistencia química se ven favorecidas de manera importante por la estructura química, que consiste en un anillo de macrociclo aromático hecho de carbono y nitrógeno, el cual crea un complejo con metales como el cobre. (Rivero et al., n.d.)

Las ftalocianinas son reconocidas por su habilidad de conservar la intensidad del color en situaciones extremas, lo que las vuelve perfectas para ser utilizadas en industrias de tecnología avanzada. Debido a su sólida estructura molecular, que resiste la degradación térmica y fotoquímica, estos colorantes son estables; este rasgo es fundamental para emplearlos en productos que necesitan ser duraderos. (Rivero et al., n.d.)

Finalmente, los colorantes heterocíclicos, que abarcan diversas estructuras químicas, tienen una efectividad más alta en los procedimientos de tinción gracias a su notable estabilidad química. La existencia de átomos como azufre, oxígeno o nitrógeno en los anillos heterocíclicos es esencial para sus propiedades singulares, posibilitando que se adhieran con mayor fuerza y duración a materiales textiles. No obstante, esta misma estabilidad química que incrementa la eficacia de los colorantes heterocíclicos puede ser, a su vez, un reto para su degradación en el medio ambiente. Esto exige el uso de métodos concretos de tratamiento para reducir al mínimo sus efectos ecológicos. (El-Seify et al., 2022)

Estas familias, debido a la complejidad de sus estructuras moleculares y a su escasa biodegradabilidad en condiciones naturales, son algunas de las más empleadas industrialmente y también de las que más problemas generan en términos ambientales.

En un análisis, se estudia la frecuencia anual de publicaciones de los artículos escogidos en cada país a lo largo del periodo 2018–2025. **Figura 9.** Se evidencia que desde el año 2021, la producción científica del tema empieza a crecer de manera gradual, alcanzando sus picos más altos en 2024 y 2025, cuando varios países reportaron investigaciones simultáneas en el campo. Este incremento podría estar vinculado con el creciente interés a nivel mundial sobre la contaminación generada por los colorantes textiles y la urgencia de poner en práctica opciones de tratamientos sostenibles.

En relación con la distribución geográfica, **Figura 8.** La gran mayoría de las publicaciones se centró en la India, asimismo, se reconoció la colaboración de países de Europa (España, Italia y Finlandia), Asia (China, Japón, Indonesia y Turquía) y América Latina (Perú, Argentina, Colombia, México y Brasil), lo que evidencia que el interés por este asunto va más allá de las fronteras y se ha convertido en un reto medioambiental a nivel mundial. Es importante destacar que la existencia de estudios en países emergentes y productores de textiles, como los latinoamericanos, indica una relación directa entre el tamaño del impacto industrial y la producción de conocimiento científico enfocado en la biorremediación.

En tal caso, la utilización de hongos de podredumbre blanca se presenta como una de las estrategias más prometedoras para la biorremediación de efluentes textiles. Estos organismos tienen un sistema enzimático muy eficaz y complejo que les posibilita descomponer la lignina, colores sintéticos y pigmentos naturales, los cuales son compuestos aromáticos difíciles de tratar. Su mecanismo de acción consiste en la producción extracelular de enzimas ligninolíticas y la liberación de metabolitos oxidativos con bajo peso molecular, lo que les permite descomponer estructuras químicas muy estables y convertir moléculas grandes en compuestos más simples y, en varios casos, mineralizables. (Torres-Farradá et al., 2024)

La lacasa (Lac) es la enzima ligninolítica (**Figura 11**) más reportada en las investigaciones estudiadas, con 65 registros. En la oxidación de fenoles y aminas aromáticas, esta multicobre oxidasa emplea oxígeno molecular como receptor de electrones. Su rango de acción se expande en presencia de mediadores redox, lo que le permite oxidar compuestos no fenólicos. La lignina peroxidasa (LiP), que se ha documentado en 41 investigaciones, es la encargada de oxidar enlaces C-O y C-C en compuestos no fenólicos con un alto potencial redox al generar radicales catiónicos. Este proceso es crucial para descomponer colorantes trifenilmetano y antraquinónicos. Asimismo, la manganeso peroxidasa (MnP), que también fue reportada en 41 casos, transforma Mn^{2+} en Mn^{3+} . Este último es un mediador oxidante difusible que tiene la capacidad de ingresar a matrices lignocelulósicas y oxidar fenoles cuando se estabiliza por ácidos orgánicos. Estos tres enzimas son las más utilizadas en los procedimientos de decoloración. (Kumar & Chandra, 2020)

A estas enzimas se añaden otras que han adquirido una gran importancia recientemente. La peroxidasa versátil (VP) tiene la capacidad de oxidar sustratos fenólicos y no fenólicos, ya que fusiona las funciones de LiP y MnP. Esto resulta particularmente beneficioso ante moléculas complejas y difíciles de degradar. Por otro lado, la familia de las peroxidases DyP es más nueva y se ha encontrado en diversos Hongos de podredumbre blanca. Tienen una marcada afinidad con colorantes sintéticos azoicos y antraquinónicos, lo que incrementa considerablemente el repertorio de compuestos degradables. (Barber-Zucker et al., 2022)

Los Hongos de podredumbre blanca, aparte de las enzimas, secretan metabolitos con bajo peso molecular que son esenciales para el proceso de degradación. Ejemplos de estos metabolitos son los ácidos oxálico, succínico y málico. Estos compuestos intervienen en la generación y estabilización de Mn^{3+} , además de funcionar como mediadores en las reacciones redox y favorecer la creación de especies muy reactivas, como los radicales hidroxilo ($\cdot OH$). Así, posibilitan oxidaciones indirectas, penetran en áreas donde las enzimas no pueden entrar y atacan enlaces químicos especialmente estables, lo que complementa la acción de las enzimas. (Graż, 2024)

Las enzimas y los metabolitos inciden sobre las sustancias aromáticas durante el proceso de degradación, en una sucesión que implica la ruptura de enlaces C-O y C-C, la eliminación de sustituyentes y la apertura de anillos aromáticos. Por lo tanto, se producen productos más sencillos, como los ácidos aromáticos, aldehídos y fenoles, que son más propensos a sufrir cambios posteriores. Una fracción de estos compuestos intermedios es absorbida por las hifas del hongo, donde se incorporan a vías metabólicas intracelulares que comprenden reacciones de descarboxilación, oxidaciones y hidroxilaciones, convirtiéndose en metabolitos más simples. En numerosos casos, el proceso progresa hasta llegar a una mineralización total o parcial, dando lugar a la creación de sales minerales, agua y dióxido de carbono. Es importante señalar que la eficacia de este procedimiento depende del tipo de hongo y de las condiciones del medioambiente. Cada Hongo de podredumbre blanca tiene diferencias en la cantidad y expresión de sus enzimas, además de su capacidad para tolerar cambios en el pH, la temperatura, la presencia de nutrientes e inductores. Estos elementos son los que determinan qué enzimas prevalecen, cuán rápido es el proceso y hasta qué punto se logra la mineralización. (H. Kato et al., 2024)

Es importante destacar que el metabolismo oxidativo de estos organismos es más eficiente bajo condiciones aerobias, ya que el oxígeno molecular se convierte en el aceptor final de electrones en las reacciones catalizadas por las enzimas ligninolíticas, las cuales se descomponen de una forma más adecuada en condiciones aerobias, manteniendo su estabilidad y actividad catalítica dado que su eficiencia se ve incrementada, permitiendo de este modo que la remoción de los contaminantes obtenga los resultados deseados. (Luis Domínguez-Guilarte et al., n.d.)

La **Tabla 2** contiene un total de 58 especies distintas que tienen capacidad para degradar colorantes, entre las cuales resaltan especialmente *Trametes versicolor* (19%) ampliamente reconocido por su eficiencia en la decoloración de diversos tipos de colorantes, *Pleurotus ostreatus* (18%) valorado por su versatilidad metabólica y adaptación a distintos sustratos y *Phanerochaete chrysosporium* (15%) por su producción sostenida de peroxidasas. (De & Biotransformación, n.d.). Debido a su eficacia probada en la degradación de varios tipos de colorantes, estas especies, que se han estudiado extensamente por su capacidad enzimática, concentran gran parte del trabajo de investigación. Además, se citó con frecuencia a otras especies como *Trametes hirsuta*, *Ganoderma lucidum* y *Bjerkandera adusta*, lo cual respalda la noción de que los hongos de pudrición blanca tienen un potencial biotecnológico significativo para abordar el desafío de la contaminación textil. (**Figura 10**).

En los artículos revisados, el género que se presentó con más frecuencia fue *Trametes versicolor* (19%). Este hongo de podredumbre blanca, que crece principalmente en madera muerta de árboles, es uno de los más investigados para la biodegradación de colorantes industriales textiles por su habilidad para generar enzimas ligninolíticas extracelulares. La lacasa, la manganeso peroxidasa (MnP) y la lignina peroxidasa (LiP) son algunas de las más notorias. Los estudios revisados reportaron una producción enzimática de 89.55% para las enzimas LiP y MnP, y de 89.95% para las lacasas (**figura 13**). Su lacasa presenta alta estabilidad y actividad catalítica incluso bajo variaciones de pH (4–7) y temperatura (25–35 °C), lo que muestra una alta eficiencia enzimática. Estas enzimas son esenciales al tener la habilidad de descomponer y oxidar una extensa variedad de compuestos orgánicos complejos, entre los cuales se encuentran muchos colorantes difíciles que se emplean en el sector textil. (Herath et al., 2024)

Trametes versicolor presentó una eficacia media en los estudios analizados de 89,90% respecto a la capacidad de decoloración (**Figura 14**). Esta efectividad se ha evidenciado con varios tipos de colorantes, como los antraquinónicos, trifenilmetano, azoicos y poliméricos heterocíclicos, logrando porcentajes altos de eliminación en cada uno de los casos (**Tabla 2**). Estos hallazgos identifican a *T. versicolor* como una de las especies más eficaces y flexibles entre los hongos de podredumbre blanca para la biorremediación de efluentes textiles.

La función de *Trametes versicolor* en la biorremediación de colorantes sintéticos incluye un elemento fundamental: su sistema enzimático ligninolítico, sobre todo la lacasa, que tiene la capacidad de oxidar estructuras aromáticas complejas encontradas en los colorantes. Se ha informado que la incorporación de mediadores redox, como HBT y ABTS, aumenta de manera importante la actividad de la lacasa, lo que acelera el proceso de decoloración de colorantes antraquinónicos y azoicos, los cuales tienden a ser los más difíciles de eliminar mediante métodos convencionales. Asimismo, se ha utilizado la estrategia de inmovilización en matrices como el alginato de calcio; esto mejora la estabilidad de las enzimas de *T. versicolor* y posibilita que el sistema sea reutilizado en varios ciclos de tratamiento. Con esta perspectiva, se han logrado eficiencias de decoloración que varían entre el 58% y el 98%, dependiendo del tipo de colorante y las condiciones del proceso. (Torres-Farradá et al., 2024)

La utilización de *T. versicolor* en sistemas de biorreactor ha evidenciado, además, su eficacia para eliminar colorantes presentes en aguas residuales textiles; lo consigue no solo al reducir la intensidad del color, sino también

al minimizar la toxicidad vinculada a los subproductos de degradación. Estos hallazgos demuestran que *Trametes versicolor* se convierte en un hongo ideal para decolorar y detoxificar efluentes textiles mediante el uso de lacasas, mediadores y tácticas de inmovilización. Esto lo hace uno de los hongos con más versatilidad dentro del grupo de hongos de podredumbre blanca para ser usados en aplicaciones biorremediadoras. (Torres-Farradá et al., 2024)

Trametes versicolor es conocido por su adaptabilidad y eficacia en la descomposición de una gran gama de colorantes textiles. Sin embargo, otras especies de hongos también han mostrado una gran habilidad para biodegradar estos compuestos. Un ejemplo es *Pleurotus ostreatus*, que fue reportado en veinticinco ocasiones, lo que equivale al 18% de las investigaciones examinadas (**Figura 10**). Este hongo se caracteriza por su facilidad de cultivo y su capacidad de crecer sobre residuos agroindustriales lignocelulósicos, lo que representa una alternativa económica y sostenible para su aplicación biotecnológica debido a su habilidad para descomponer una extensa variedad de compuestos complejos. (Li et al., 2022)

La reducción de colorantes textiles con *Pleurotus ostreatus* tiene una efectividad del 88.60% (**Figura14**). Esto se explica sobre todo por su sistema enzimático ligninolítico, que está compuesto por lacasas (85,46%), manganeso peroxidasa (MnP) y lignina peroxidasa (LiP), los cuales representan el 86,99% cada uno, como se muestra en la **figura 13**. Estas enzimas son cruciales para descomponer compuestos complejos y resistentes, como los colorantes azoicos, antraquinónicos, trifenilmetano, ftalocianinas e indigoides, además de reactivos que se emplean mucho en el sector textil, como Methyl Green, Reactive Black-5, Indigo Carmine, Cibacet Brilliant Blue, Remazol Brilliant Violet y Direct Red-5B. **Tabla 2**.(Li et al., 2022). Su abundante producción de lacasa les permite actuar en un amplio rango de pH (4–8) y temperaturas moderadas (25–32 °C), mostrando buena tolerancia a efluentes reales que contienen colorantes, metales pesados y otras sustancias tóxicas. No obstante, su mecanismo de remoción no siempre se basa en la degradación total del contaminante: en muchos casos, parte de la decoloración observada se debe a adsorción del colorante en el micelio, más que a su transformación química completa. Esto puede limitar la eficacia de *Pleurotus* en tratamientos que requieran mineralización total del contaminante.(Pezzella et al., 2014)

Además, se observó que *P. ostreatus* genera azoreductasas con una *P.* eficacia del 97,40% y tirosinasas (90%), las cuales, junto con otras oxidasas fúngicas, contribuyen a convertir los productos intermedios en compuestos menos complejos y menos tóxicos. Las azoreductasas son las encargadas de romper los enlaces azo. No solo ayuda a que se decoloren los efluentes visibles, sino también a que disminuya su toxicidad esta sinergia enzimática, lo cual es un factor importante en los procesos de biorremediación de colorantes textiles.(A. Kalia & Singh, 2020).)

La especie *Phanerochaete chrysosporium* es considerado un organismo modelo en los estudios de biodegradación debido a que fue uno de los primeros en demostrarse capaz de mineralizar completamente la lignina.(Konan et al., 2024). Se mencionó 21 veces en los artículos estudiados, lo que supone cerca del 15% de su uso en la literatura pertinente. Su sistema enzimático está dominado por la producción de lignina peroxidasa (LiP) y manganeso peroxidasa (MnP) son enzimas fundamentales que forman parte del sistema enzimático ligninolítico de este basidiomiceto.(Nakazawa et al., 2023). Estas enzimas confieren una alta capacidad oxidativa frente a estructuras aromáticas complejas y a ciertos colorantes de tipo azo y antraquinona, logrando un porcentaje de decoloración de hasta el 87,90%.

No obstante, *P. chrysosporium* presenta limitaciones en su uso a gran escala: su crecimiento requiere altos niveles de oxígeno y baja concentración de nitrógeno para inducir la producción de enzimas, condiciones difíciles de mantener en sistemas abiertos o de tratamiento de aguas residuales reales. Además, este hongo no produce lacasa en condiciones normales, lo que restringe su capacidad para oxidar compuestos no fenólicos o menos reactivos. (Hatakka, 1994) A pesar de su potencia enzimática, su sensibilidad ambiental y lento crecimiento micelial reducen su competitividad frente a otros hongos más adaptables.

El hecho de que la decoloración llevada a cabo por este hongo no dependa del sistema cromofórico del colorante es una de las razones fundamentales para el uso frecuente de *P. chrysosporium* en la eliminación de colorantes textiles industriales. Esto implica que tiene la capacidad de degradar colorantes de varias clases químicas y estructuras, lo que incluye una extensa gama de colorantes reactivos, indigoides, trifenilmetano, antraquinónicos y azoicos. Con una eficacia promedio del 86,10%, el hongo ha demostrado su capacidad para descomponer y decolorar una serie de colorantes. (Akbar Aly et al., 2025) Se han utilizado varios métodos para su implementación en distintos medios sólidos o líquidos. Asimismo, ha demostrado ser especialmente efectivo en la decoloración de tintes que se emplean frecuentemente en el sector textil, como son Direct Yellow 11, Basic Brown 1, Indigo Carmine, Orange II, Red 8-BLP y Direct Black 80. *Phanerochaete chrysosporium* se ha inmovilizado en varias matrices, como son las cáscaras de cebada, las perlas de alginato, la espuma de poliuretano, la esponja de acero y las semillas de

uva, con el fin de incrementar su uso a escala industrial (Stefanía et al., n.d.). La inmovilización facilita un empleo más eficaz del hongo, ya que aumenta su capacidad de reutilización en biorreactores y su estabilidad. Este procedimiento implica la fijación de los microorganismos sobre una matriz sólida, lo que permite que se puedan utilizar de forma prolongada y continua en sistemas industriales sin tener que reemplazarlos con frecuencia. Esta estrategia es particularmente beneficiosa en el campo de la biotecnología, ya que promueve la degradación de sustancias complejas y la creación de productos con valor agregado. (Svobodová & Novotný, 2018)

La innovación y el potencial de las enzimas fúngicas inmovilizadas, en cuanto a la biodegradación y la biosíntesis, es destacada por los estudios científicos. Estas enzimas, cuando están inmovilizadas, tienen la capacidad de ser utilizadas de nuevo en diferentes ciclos, lo que disminuye notablemente los gastos operativos y favorece la sostenibilidad de los procesos. (Gao et al., 2022)

En la industria se utilizan varios métodos de inmovilización, cada uno con particularidades propias que se adaptan a distintas condiciones operativas y necesidades de los procesos. Esto aumenta las oportunidades de uso de este enfoque biotecnológico. (Gao et al., 2022)

En conjunto, aunque las tres especies pertenecen al mismo grupo funcional de hongos ligninolíticos, presentan diferencias significativas en su fisiología y comportamiento enzimático. *P. chrysosporium* posee un sistema enzimático potente pero menos flexible, dependiente de condiciones controladas; *Pleurotus spp.* ofrece una alternativa práctica y de bajo coste, con buena tolerancia ambiental pero limitada capacidad de mineralización; mientras que *T. versicolor* combina ambas ventajas, mostrando alta estabilidad, adaptabilidad y eficiencia catalítica, por lo que es considerada la mejor candidata para la biorremediación de colorantes sintéticos.

Asimismo, se analizó a *Ganoderma lucidum*, también llamado hongo *reishi*, una especie con propiedades exclusivas y gran capacidad para adaptarse a distintas condiciones del medio ambiente. Este hongo se encuentra en diversos hábitats, especialmente en zonas tropicales y templadas, lo cual le posibilita desarrollarse en diversos contextos climáticos y geográficos. En varias regiones del mundo se ha registrado su presencia, lo que pone de manifiesto su adaptabilidad y su rol ecológico en los ecosistemas donde se sitúa. (López & Moretta, 2020)

G. lucidum, además de ser distribuido de manera natural, también ha sido cultivado en ambientes controlados para determinar su potencial para biodegradar compuestos específicos, como los colorantes textiles industriales. El uso de este hongo ha sido reportado en aproximadamente el 8% de los estudios sobre la remediación de colorantes textiles industriales, lo cual pone de relieve su importancia dentro del ámbito de la biotecnología ambiental. (He et al., 2023)

La habilidad de *G. lucidum* para la remoción de colorantes proviene de su capacidad para descomponer compuestos orgánicos complejos, lo que los convierte en elementos menos tóxicos. La eficiencia de este proceso se ve favorecida por su sistema enzimático ligninolítico, que está conformado por lacasas, manganeso peroxidasa (MnP) y lignina peroxidasa (LiP), con una efectividad informada del 90,86% para cada enzima. Además, genera azoreductasas y tirosinasas, ambas con una eficacia del 100% (**Figura 13**), que intervienen en la ruptura de enlaces químicos de los colorantes, facilitando su transformación y posterior eliminación del agua. (S. Kato & Kansha, 2024)

Trametes hirsuta y *Bjerkandera adusta*, con ocho (6%) y nueve reportes (6%), respectivamente, fueron las especies más frecuentes en los artículos analizados. A pesar de que su porcentaje de uso fue inferior al de especies más investigadas, como *Trametes versicolor* o *Phanerochaete chrysosporium*, las dos son opciones biotecnológicas atractivas para eliminar colorantes textiles industriales.

Bjerkandera adusta es un hongo de descomposición blanca que se distingue por generar enzimas ligninolíticas, en particular peroxidasa de manganeso (MnP) con una producción del 90,70%, lacasa con el 89,78%, lignina peroxidasa con el 80% y peroxidasa versátil (VP). Estas enzimas le posibilitan la degradación de compuestos recalcitrantes, tales como los colorantes antraquinónicos y azoicos. Su menor frecuencia en los artículos analizados puede ser resultado de que ha sido menos investigado experimentalmente. (Aragaw et al., 2024)

Por otro lado, *Trametes hirsuta*, genera igualmente un sistema enzimático ligninolítico eficaz, centrándose en la actividad de las lacasas. Estas son enzimas muy conocidas por su capacidad para degradar diversas estructuras químicas (Ancona-Escalante et al., 2018). Aunque en este análisis el porcentaje es bajo, la literatura indica que *T. hirsuta* ha presentado resultados favorables en la degradación de colorantes sintéticos (93.52%), por lo cual continúa siendo una especie con potencial para investigaciones futuras.

En conjunto, a pesar de que las dos especies representan una proporción más pequeña de los estudios recopilados, su incorporación demuestra la variedad de hongos de podredumbre blanca con potencial para la biorremediación de efluentes textiles. Esto implica que existen más hongos, aparte de las especies más estudiadas, que tienen potencial por descubrir, lo cual extiende el espectro de opciones sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes.

Figura 12. En la gráfica se evidencia el uso de diversas técnicas de biorremediación empleadas en investigaciones con los hongos de podredumbre blanca. La técnica más reportada es el uso de lacasa (15 veces), que se considera una de las enzimas más investigadas por su adaptabilidad en la oxidación de compuestos aromáticos, como fenoles, tintes textiles y contaminantes emergentes. Se fundamenta en la transferencia de electrones al oxígeno molecular, lo que produce radicales fenólicos que provocan reacciones de degradación. (Jeon et al., 2010)

En segundo lugar, están los ensayos de decoloración/análisis (14 veces), que permiten evaluar cuán efectivos son los hongos o sus enzimas para eliminar colorantes. La base para la evaluación experimental previa a escalar los procesos a nivel industrial está compuesta por estos ensayos, que establecen parámetros tales como el porcentaje de decoloración, la disminución de toxicidad y la mineralización parcial. (Ge et al., 2024)

El tercer puesto lo ocupa la inmovilización de micelio o enzimas (13 veces). Esta técnica consiste en fijar las enzimas o el micelio a soportes sólidos (como membranas, perlas o polímeros), lo que hace posible su reutilización en varios ciclos, eleva la tolerancia ante condiciones extremas y disminuye los costos (Datta et al., 2012). Además, sobresalen la biosorción (11 veces) y los biorreactores (12 veces), que demuestran su importancia en la eliminación de contaminantes al proporcionar opciones tanto a nivel celular completo como enzimático. (Svobodová & Novotný, 2018)

La micorremediación (9 veces), que utiliza cultivos fúngicos completos y ejerce su acción simultáneamente mediante biosorción y degradación enzimática, es otra técnica de menor frecuencia, pero igualmente importante (Akhtar & Mannan, 2020). Esta estrategia es más parecida a las condiciones naturales y se ajusta eficazmente a los residuos sólidos y a los suelos. Por último, las técnicas que tienen menos reportes son la fermentación sumergida (SmF) y la fermentación en estado sólido (SSF), cada una con seis menciones; además de los co-cultivos/consorcios microbianos, con cinco.

En términos generales, la **Figura 12** muestra que las estrategias más comunes en la biorremediación con hongos se centran en el empleo de enzimas, particularmente lacasas; esto subraya la relevancia del enfoque basado en enzimas frente a otros procedimientos.

Los resultados obtenidos indican que la biorremediación de colorantes textiles mediante hongos de pudrición blanca constituye una opción firme y efectiva entre las tecnologías ambientales contemporáneas. La presencia predominante de especies como *Trametes versicolor*, *Phanerochaete chrysosporium* y *Pleurotus ostreatus* se debe a la capacidad de sus sistemas enzimáticos ligninolíticos para funcionar sobre estructuras complejas y resistentes. Estos sistemas posibilitan no solamente la decoloración perceptible de los efluentes, sino además la conversión de los intermediarios en compuestos de menor toxicidad, lo cual fortalece su utilidad en procesos que persiguen la sostenibilidad. (Ge et al., 2024)

Asimismo, la detección de más de 50 especies con potencial enzimático demuestra que el estudio está en constante crecimiento y que hay posibilidades de diversificar la aplicación de hongos para eliminar contaminantes. Este panorama permite la oportunidad de investigar combinaciones de cepas, mejorar las condiciones de los experimentos y utilizar métodos complementarios para aumentar la eficiencia de los procesos y asegurar un impacto más significativo en la reducción de la contaminación textil.

5. CONCLUSIONES

- La comparación analítica efectuada corrobora que los hongos de podredumbre blanca son una opción biotecnológica con gran capacidad para la biorremediación de efluentes textiles, lo cual resalta la importancia que tiene este ámbito para las ciencias medioambientales, la microbiología aplicada y la biotecnología industrial.

- La revisión indica que el sistema enzimático ligninolítico es el centro catalítico más efectivo para descomponer compuestos recalcitrantes. Esto plantea la hipótesis de que su optimización a través de ingeniería enzimática o consorcios microbianos podría aumentar notablemente la eficiencia de los procesos industriales.
- El análisis de la literatura ha posibilitado determinar que las especies más empleadas y estudiadas son *Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus* y *Phanerochaete chrysosporium*, ya que cuentan con una alta eficacia en el proceso de eliminación del color de diversas familias de colorantes, lo cual las establece como modelos a seguir dentro de este ámbito. Sin embargo, otras especies tienen un potencial poco estudiado que ofrece muchas oportunidades para su uso en el futuro.
- La variedad de métodos utilizados en los estudios analizados, que van desde ensayos de decoloración y biosorción hasta la implementación de biorreactores e inmovilización en soportes sólidos, evidencia el progreso metodológico del campo y la búsqueda constante de opciones más sostenibles y eficaces. Esta situación muestra que es necesario combinar enfoques que aumenten la efectividad de los hongos y hagan más factible su uso a gran escala.
- La continuidad y toxicidad de los colorantes textiles, especialmente de las familias azoicos, antraquinónicos y ftalocianinas, ratifican la necesidad urgente de aplicar tecnologías sustentables que aseguren su eliminación eficiente. En este marco, los hongos de descomposición blanca parecen ser una opción factible y con escaso impacto en el medio ambiente, en comparación con los tratamientos físico-químicos tradicionales.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adebayo, E. A., Azeez, M. A., Alao, M. B., Oke, A. M., & Aina, D. A. (2021). Fungi as veritable tool in current advances in nanobiotechnology. *Heliyon*, 7(11), e08480. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E08480>
- Agnestisia, R., Panjaitan, D., Erdene-Ochir, T., Nion, Y. A., Ramdhani, E. P., Krissilvio, E. J., & Karelius, K. (2024). Decolorization of Rhodamine B by the white rot fungus *Corioliopsis caperata* isolated from Central Kalimantan Forest. *BIO Web of Conferences*, 134. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413406011>
- Akbar Aly, A. B., Shanmugaraj, B., & Ramalingam, S. (2025). Industrial applications of *Phanerochaete chrysosporium* lignin-degrading enzymes: current status, production challenges, and future directions. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 41(5), 1–18. <https://doi.org/10.1007/S11274-025-04388-6/METRICS>
- Akhtar, N., & Mannan, M. A. ul. (2020). Mycoremediation: Expunging environmental pollutants. *Biotechnology Reports*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00452>
- Ambiental, I., Leiva, B. N., Asesor, A., Marieta, M. S., & Cervantes Peralta, E. (2023). “ANÁLISIS DE LOS HONGOS LIGNINOLÍTICOS COMO DEGRADADORES DE COLORANTES TEXTILES” Tesis para optar al título profesional de. <https://orcid.org/0000-0001-9405-7048>
- Ancona-Escalante, W., Tapia-Tussell, R., Pool-Yam, L., Can-Cauich, A., Lizama-Uc, G., & Solís-Pereira, S. (2018). Laccase-mediator system produced by *Trametes hirsuta* Bm-2 on lignocellulosic substrate improves dye decolorization. *3 Biotech*, 8(7), 1–8. <https://doi.org/10.1007/S13205-018-1323-Y/METRICS>
- Andriani, A., & Yanto, D. H. Y. (2022). Comparative kinetic study on biodecolorization of synthetic dyes by *Bjerkandera adusta* SM46 in alginate beads-packed bioreactor system and shaking culture under saline-alkaline stress. *Biocatalysis and Biotransformation*, 40(4), 296–307. <https://doi.org/10.1080/10242422.2021.1929193>
- Aragaw, T. A., Bogale, F. M., & Tesfaye, E. L. (2024). Oxidative ligninolytic enzymes and their role in textile dye biodegradation: a comprehensive review. *Water Practice and Technology*, 19(9), 3598–3630. <https://doi.org/10.2166/WPT.2024.229>
- Ardila-Leal, L. D., Poutou-Piñales, R. A., Pedroza-Rodríguez, A. M., Quevedo-Hidalgo, B. E., Capela, I., Kamali, M., & Zuurro, A. (2021). A Brief History of Colour, the Environmental Impact of Synthetic Dyes and Removal by Using Laccases. *Molecules* 2021, Vol. 26, Page 3813, 26(13), 3813. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26133813>
- Aslam, S., & Bilal, M. (2022). *Pleurotus*-Derived Laccases, Immobilization, and Bioremediation Applications. *Microorganisms for Sustainability*, 30, 49–69. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4574-7_3/FIGURES/5
- Backes, E., Kato, C. G., da Silva, T. B. V., Uber, T. M., Pasquarelli, D. L., Bracht, A., & Peralta, R. M. (2022). Production of fungal laccase on pineapple waste and application in detoxification of malachite green. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 57(2), 90–101. <https://doi.org/10.1080/03601234.2022.2025739>
- Bakar, B., Birhanlı, E., Ulu, A., Boran, F., Yeşilada, Ö., & Ateş, B. (2024). Immobilization of *Trametes trogii* laccase

- on polyvinylpyrrolidone-coated magnetic nanoparticles for biocatalytic degradation of textile dyes. *Biocatalysis and Biotransformation*, 42(2), 194–211. <https://doi.org/10.1080/10242422.2023.2173006>
- Barber-Zucker, S., Mindel, V., Garcia-Ruiz, E., Weinstein, J. J., Alcalde, M., & Fleishman, S. J. (2022). Stable and Functionally Diverse Versatile Peroxidases Designed Directly from Sequences. *Journal of the American Chemical Society*, 144(8), 3564. <https://doi.org/10.1021/JACS.1C12433>
- Bautista-Zamudio, P. A., Flórez-Restrepo, M. A., López-Legarda, X., Monroy-Giraldo, L. C., & Segura-Sánchez, F. (2023). Biodegradation of plastics by white-rot fungi: A review. *Science of The Total Environment*, 901, 165950. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.165950>
- Benkhaya, S., M'rabet, S., & El Harfi, A. (2020). Classifications, properties, recent synthesis and applications of azo dyes. *Heliyon*, 6(1), e03271. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2020.E03271>
- Bouacem, K., Allala, F., Zaraï Jaouadi, N., Hamdi, S., Mechri, S., Ighilahriz, K., Rekik, H., Hacene, H., Bouanane-Darenfed, A., & Jaouadi, B. (2022). A novel peroxidase from white-rot Agaricomycetes fungus *Phlebia radiata* strain KB-DZ15: Its purification, characterisation, and potential application for dye-decolorisation and lignin-biodegradation. *Biocatalysis and Biotransformation*, 40(5), 365–377. <https://doi.org/10.1080/10242422.2021.1939315>
- Byrd, J. D., & Hood, E. E. (2022). Degradation of Synthetic Dyes with Plant-Produced Manganese Peroxidase and Commercial Laccase. *AATCC Journal of Research*, 9(1), 49–59. <https://doi.org/10.1177/23305517211060796>
- Chicatto, J. A., Rainert, K. T., Gonçalves, M. J., Helm, C. V., Altmajer-Vaz, D., & Tavares, L. B. B. (2018). Decolorization of textile industry wastewater in solid state fermentation with Peach-Palm (*Bactris gasipaes*) residue. *Brazilian Journal of Biology = Revista Brasleira de Biologia*, 78(4), 718–727. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.175074>
- Civzele, A., & Mezule, L. (2024). Isolation and screening of wood-decaying fungi for lignocellulolytic enzyme production and bioremediation processes. *Frontiers in Fungal Biology*, 5. <https://doi.org/10.3389/FFUNB.2024.1494182>
- Coelho, G. D., Silva, M. A., de Melo Pinheiro, M. A., Nadvorny, D., Costa Amador, V., & Maia, R. T. (2024). In silico and in vitro assays suggests Congo red dye degradation by a *Lentinus* sp. laccase enzyme. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 42(7), 3802–3813. <https://doi.org/10.1080/07391102.2023.2216282>
- Contaminación generada por colorantes de la industria textil. (n.d.). Retrieved June 7, 2025, from <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>
- Costa, F. C. R., Brito, F. S. L., de Grandi, M. J. R., & Daniel, J. F. S. (2025). White Rot Fungi for Biodegradation of Dyes: Potential for Industrial Uses - A Review. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 36(6), e-20250024. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20250024>
- Cruz, I. D. A., Cruz-Magalhães, V., Loguercio, L. L., dos Santos, L. B. P. R., Uetanabaro, A. P. T., & Costa, A. M. da. (2024). A systematic study on the characteristics and applications of laccases produced by fungi: insights on their potential for biotechnologies. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 54(7), 896–909. <https://doi.org/10.1080/10826068.2023.2297697>
- Datta, S., Christena, L. R., & Rajaram, Y. R. S. (2012). Enzyme immobilization: an overview on techniques and support materials. *3 Biotech*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.1007/S13205-012-0071-7>
- Deng, W., Ge, M., Wang, Z., Weng, C., & Yang, Y. (2024). Efficient degradation and detoxification of structurally different dyes and mixed dyes by LAC-4 laccase purified from white-rot fungi *Ganoderma lucidum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 279, 116450. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116450>
- Deshmukh, A., Sattikar, P., Sukhatankar, A., Wakade, G., Kumbhar, P., & Kommoju, P. R. (2026). Optimized Laccase production from the white rot fungi *Pleurotus ostreatus* and *Trametes versicolor*. *Protein Expression and Purification*, 237, 106813. <https://doi.org/10.1016/J.PEP.2025.106813>
- El-Seify, F. A., Azab, H. A., Degedy, F. S., Abdel-Mageed, K. A., & El-Dossoki, F. I. (2022). Physico-analytical studies on some heterocyclic azo dyes and their metal complexes with some transition metals. *BMC Chemistry*, 16(1), 40. <https://doi.org/10.1186/S13065-022-00833-X>
- Esteban, P., Arias, Z., Bernardo, J., Nájera, P., Chaires Hernández, I., Iván, H., Ayala, S., & Nacional, I. P. (2018). Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión. *Revista de La Facultad de Ciencias Químicas*, 19, 38–47. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/2216>
- Fernández Garrote, M. (n.d.). *Uso de microorganismos como biorremediadores de efluentes textiles contaminados por colorantes azoicos*.
- Gao, Y., Shah, K., Kwok, I., Wang, M., Rome, L. H., & Mahendra, S. (2022). Immobilized fungal enzymes: Innovations and potential applications in biodegradation and biosynthesis. *Biotechnology Advances*, 57, 107936. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2022.107936>
- Ge, M., Deng, W., Wang, Z., Weng, C., & Yang, Y. (2024). Effective Decolorization and Detoxification of Single and Mixed Dyes with Crude Laccase Preparation from a White-Rot Fungus Strain *Pleurotus eryngii*. *Molecules*, 29(3), 669. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES29030669/S1>

- Giap, V. D., Duc, H. T., Huong, P. T. M., Hanh, D. T., Nghi, D. H., Duy, V. D., & Quynh, D. T. (2022). Purification and characterization of lignin peroxidase from white-rot fungi *Pleurotus pulmonarius* CPG6 and its application in decolorization of synthetic textile dyes. *Journal of General and Applied Microbiology*, 68(6), 262–269. <https://doi.org/10.2323/jgam.2022.05.005>
- Graż, M. (2024). Role of oxalic acid in fungal and bacterial metabolism and its biotechnological potential. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 40(6), 178. <https://doi.org/10.1007/S11274-024-03973-5>
- Gugel, I., Summa, D., Costa, S., Manfredini, S., Vertuani, S., Marchetti, F., & Tamburini, E. (2024). Mycoremediation of Synthetic Azo Dyes by White-Rot Fungi Grown on Dairy Waste: A Step toward Sustainable and Circular Bioeconomy. *Fermentation* 2024, Vol. 10, Page 80, 10(2), 80. <https://doi.org/10.3390/FERMENTATION10020080>
- Gutiérrez-Soto, G., Hernández-Luna, C. E., López-Sandin, I., Parra-Saldivar, R., & Elizondo-Luevano, J. H. (2025). Purification and Biochemical Characterization of *Trametes hirsuta* CS5 Laccases and Its Potential in Decolorizing Textile Dyes as Emerging Contaminants. *Environments - MDPI*, 12(1), 16. <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS12010016/S1>
- Guzmán, J., Yuliana, P., Bedoya, G., Lida, A., Arias, M., & Ambiental Y Biotecnología, M. (n.d.). *Remoción del colorante trifenilmetano cristal violeta empleando hongos de la podredumbre blanca en cultivos líquidos y sólidos*. Retrieved September 29, 2025, from www.udea.edu.co
- Harriman, A. (2025). A Perspective on Indigo: An Iconic Colorant. *Colorants 2025*, Vol. 4, Page 12, 4(2), 12. <https://doi.org/10.3390/COLORANTS4020012>
- Hatakka, A. (1994). Lignin-modifying enzymes from selected white-rot fungi: production and role from in lignin degradation. *FEMS Microbiology Reviews*, 13(2–3), 125–135. <https://doi.org/10.1111/J.1574-6976.1994.TB00039.X>
- He, X., Chen, Y., Li, Z., Fang, L., Chen, H., Liang, Z., Abozeid, A., Yang, Z., & Yang, D. (2023). Germplasm resources and secondary metabolism regulation in Reishi mushroom (*Ganoderma lucidum*). *Chinese Herbal Medicines*, 15(3), 376. <https://doi.org/10.1016/J.CHMED.2023.01.005>
- He, X. ling, Song, C., Li, Y. yuan, Wang, N., Xu, L., Han, X., & Wei, D. sheng. (2018). Efficient degradation of Azo dyes by a newly isolated fungus *Trichoderma tomentosum* under non-sterile conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 150, 232–239. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2017.12.043>
- Herath, I. S., Sulaksha, T., Maharjan, N., Udayanga, D., Jayasanka, J., Murakami, Y., & Hewawasam, C. (2025). Comparative decolorization of four synthetic textile dyes by five white-rot fungi using the plate volume method. *Bioremediation Journal*. <https://doi.org/10.1080/10889868.2025.2522815>
- Herath, I. S., Udayanga, D., Jayasanka, D. J., & Hewawasam, C. (2024). Textile dye decolorization by white rot fungi – A review. *Bioresource Technology Reports*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101687>
- Himanshu, Behera, B., Kumari, N., Maruthi, M., Singh, R. K., & Saini, J. K. (2025). Appraisal of malachite green biodegradation and detoxification potential of laccase from *Trametes cubensis*. *Bioresource Technology*, 417, 131869. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2024.131869>
- Iannaccone, J. (2018). Acción De *Pleurotus Ostreatus* (Jacq. Ex FR) Kumm en La Remoción Del Colorante Azul Turquesa en Biorreactores Air Lift. *The Biologist*. https://www.academia.edu/97400260/Acción_De_Pleurotus_Ostreatus_Jacq_Ex_FR_Kumm_en_La_Remoción_Del_Colorante_Azul_Turquesa_en_Biorreactores_Air_Lift
- Ismail, G. A., & Sakai, H. (2022). Review on effect of different type of dyes on advanced oxidation processes (AOPs) for textile color removal. *Chemosphere*, 291, 132906. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132906>
- Jan van Eck, N., & Waltman, L. (2022). *VOSviewer Manual*.
- Jeon, J. R., Kim, E. J., Murugesan, K., Park, H. K., Kim, Y. M., Kwon, J. H., Kim, W. G., Lee, J. Y., & Chang, Y. S. (2010). Laccase-catalysed polymeric dye synthesis from plant-derived phenols for potential application in hair dyeing: Enzymatic colourations driven by homo- or hetero-polymer synthesis. *Microbial Biotechnology*, 3(3), 324–335. <https://doi.org/10.1111/J.1751-7915.2009.00153.X>
- Jeyabalan, J., Veluchamy, A., V. V. P., Kumar, A., Chandrasekar, R., & Narayanasamy, S. (2023). A review on the laccase assisted decolorization of dyes: Recent trends and research progress. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 151, 105081. <https://doi.org/10.1016/J.JTICE.2023.105081>
- Jia, Y., Huang, Q., Zhu, L., & Pan, C. (2022). Characterization of a Recombinant Laccase B from *Trametes hirsuta* MX2 and Its Application for Decolorization of Dyes. *Molecules* 2022, Vol. 27, Page 1581, 27(5), 1581. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27051581>
- Juilee, D. P., Sunita, P. H., Sucheta, P. N., & Niranjana, P. P. (2025). Fungal laccase mediated Remazol Brilliant Blue R (RBBR) dye decolorization and degradation. *Research Journal of Biotechnology*, 20(1), 36–44. <https://doi.org/10.25303/201rjbt036044>
- Kalia, A., & Singh, S. (2020). Myco-decontamination of azo dyes: nano-augmentation technologies. *3 Biotech*, 10(9), 384. <https://doi.org/10.1007/S13205-020-02378-Z>

- Kalia, S., Samuchiwal, S., Dalvi, V., & Malik, A. (2024). Exploring fungal-mediated solutions and its molecular mechanistic insights for textile dye decolorization. *Chemosphere*, 360, 142370. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2024.142370>
- Kato, H., Miura, D., Kato, M., & Shimizu, M. (2024). Metabolic mechanism of lignin-derived aromatics in white-rot fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(1), 532. <https://doi.org/10.1007/S00253-024-13371-4>
- Kato, S., & Kansha, Y. (2024). Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(39), 51064. <https://doi.org/10.1007/S11356-024-34584-0>
- Kijpornyongpan, T., Schwartz, A., Yaguchi, A., & Salvachúa, D. (2022). Systems biology-guided understanding of white-rot fungi for biotechnological applications: A review. *IScience*, 25(7), 104640. <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2022.104640>
- Koblitz, H. (1988). Anthraquinones. *Phytochemicals in Plant Cell Cultures*, 113–139. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-715005-5.50014-5>
- Konan, D., Ndao, A., Koffi, E., Elkoun, S., Robert, M., Rodrigue, D., & Adjallé, K. (2024). Biodecomposition with *Phanerochaete chrysosporium*: A review. *AIMS Microbiology*, 10(4), 1068. <https://doi.org/10.3934/MICROBIOL.2024046>
- Kumar, A., & Chandra, R. (2020). Ligninolytic enzymes and its mechanisms for degradation of lignocellulosic waste in environment. *Heliyon*, 6(2), e03170. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2020.E03170>
- Kusumlata, Ambade, B., Kumar, A., & Gautam, S. (2024). Sustainable Solutions: Reviewing the Future of Textile Dye Contaminant Removal with Emerging Biological Treatments. *Limnological Review 2024, Vol. 24, Pages 126-149*, 24(2), 126–149. <https://doi.org/10.3390/LIMNOLREV24020007>
- Laksmi, F. A., Agustriana, E., Nuryana, I., Rachmayati, R., Perwitasari, U., Rumaisha, & Andriani, A. (2021). Removal of Textile Dye, RBBR, via Decolorization by *Trametes hirsuta* AA-017. *Biosaintifika*, 13(3), 319–327. <https://doi.org/10.15294/biosaintifika.v13i3.31632>
- Latif, W., Ciniglia, C., Iovinella, M., Shafiq, M., & Papa, S. (2023). Role of White Rot Fungi in Industrial Wastewater Treatment: A Review. *Applied Sciences 2023, Vol. 13, Page 8318*, 13(14), 8318. <https://doi.org/10.3390/APP13148318>
- Li, G., Wang, Y., Yu, D., Zhu, P., Zhao, G., Liu, C., & Zhao, H. (2022). Ligninolytic characteristics of *Pleurotus ostreatus* cultivated in cotton stalk media. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1035040. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2022.1035040/BIBTEX>
- López, A. Á., & Moretta, P. Y. (2020). Evaluation of growth efficiency of the mycelium of *Ganoderma lucidum* (Ganodermataceae), a fungus with high potential for textile use in Ecuador, in three organic substrates. *Ciencia Digital*, 4(3), 210–228. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i3.1324>
- Luis Domínguez-Guilarte, O., Ramos-Leal, M., Sánchez-Reyes, A., Manzano -León, A. M., Argüelles-Álvarez, J., Sánchez-López, I., & Guerra-Rivera, G. (n.d.). Degradación biológica de contaminantes orgánicos persistentes por hongos de la podredumbre blanca RESEÑA ANALÍTICA. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 42(2), 51–59.
- Maestra, E. N., & Biotecnología, Y. (2019). *Decoloración de agua residual de una industria textil por Pleurotus ostreatus*. http://repositorio.uatx.mx:8443/jspui/handle/DSyTI_UATx/1482
- Mahuri, M., Paul, M., & Thatoi, H. (2023). A review of microbial laccase production and activity toward different biotechnological applications. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 3(4), 533–551. <https://doi.org/10.1007/S43393-023-00163-6>
- Mejía-Otálvaro, F., Merino-Restrepo, A., & Hormaza-Anaguano, A. (2021). Evaluation of a *Trametes pubescens* laccase concentrated extract on allura red AC decolorization without the addition of synthetic mediators. *Journal of Environmental Management*, 285, 112117. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112117>
- Mendoza-Retana, S. S., Cervantes-Vázquez, M. G., Valenzuela-García, A. A., Guzmán-Silos, T. L., Orona-Castillo, I., Cervantes-Vázquez, T. J. Á., Mendoza-Retana, S. S., Cervantes-Vázquez, M. G., Valenzuela-García, A. A., Guzmán-Silos, T. L., Orona-Castillo, I., & Cervantes-Vázquez, T. J. Á. (2021). Uso potencial de las aguas residuales en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(1), 115–126. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V12I1.2789>
- Muliyadi, S. A., Mulok, T. E. T. Z., Hussain, N. H., & Nor, R. M. (2022). BIOREMEDIATION OF TEXTILE WASTEWATER USING *Pleurotus pulmonarius*. *Journal of Sustainability Science and Management*, 17(2), 67–76. <https://doi.org/10.46754/jssm.2022.02.007>
- Mutegoa, E. (2024). Efficient techniques and practices for wastewater treatment: an update. *Discover Water 2024 4:1*, 4(1), 1–27. <https://doi.org/10.1007/S43832-024-00131-8>
- Nagraj, Chaurasia, P. K., Bharati, S. L., Sharma, N., Kumar, J., & Sivalingam, A. M. (2025). Degradation of dyes by fungi: An overview on recent updates. *Microbe (Netherlands)*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100232>
- Nakazawa, T., Yamaguchi, I., Zhang, Y., Saka, C., Wu, H., Kayama, K., Kawauchi, M., Sakamoto, M., & Honda, Y. (2023). Experimental evidence that lignin-modifying enzymes are essential for degrading plant cell wall lignin by *Pleurotus ostreatus* using CRISPR/Cas9. *Environmental Microbiology*, 25(10), 1909–1924.

<https://doi.org/10.1111/1462-2920.16427>

- Niazi, A. R., Ghafoor, A., & Mushtaq, A. (2024). Systematic characterisation, and effect of nutritional and physical parameters on culturability, laccase production and dye decolorisation potential by *P. pistillar* from Pakistan. *Natural Product Research*, 38(20), 3519–3527. <https://doi.org/10.1080/14786419.2023.2253558>
- Ogugbue, C. J., & Sawidis, T. (2011). Bioremediation and Detoxification of Synthetic Wastewater Containing Triarylmethane Dyes by *Aeromonas hydrophila* Isolated from Industrial Effluent. *Biotechnology Research International*, 2011, 967925. <https://doi.org/10.4061/2011/967925>
- Osorio, J., & Quintero, J. C. (2018). Decolorization of industrial dye Erionyl Turquoise by the white rot fungi *Bjerkandera* sp. R1. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 41(1), 32–40.
- Patel, H., Yadav, V. K., Yadav, K. K., Choudhary, N., Kalasariya, H., Alam, M. M., Gacem, A., Amanullah, M., Ibrahim, H. A., Park, J. W., Park, S., & Jeon, B. H. (2022). A Recent and Systemic Approach Towards Microbial Biodegradation of Dyes from Textile Industries. *Water* 2022, Vol. 14, Page 3163, 14(19), 3163. <https://doi.org/10.3390/W14193163>
- Periyasamy, A. P. (2025). A review of bioremediation of textile dye containing wastewater. *Cleaner Water*, 4, 100092. <https://doi.org/10.1016/J.CLWAT.2025.100092>
- Pezzella, C., Russo, M. E., Marzocchella, A., Salatino, P., & Sannia, G. (2014). Immobilization of a *Pleurotus ostreatus* Laccase Mixture on Perlite and Its Application to Dye Decolourisation. *BioMed Research International*, 2014, 308613. <https://doi.org/10.1155/2014/308613>
- Ramayanam, B. M. (2025). Laccase enzyme production from *Trametes versicolor* : a sustainable approach to treat raw dye bath textile effluent. *Essential Chem*, 2(1). <https://doi.org/10.1080/28378083.2025.2527045>
- Reddy, S., & Osborne, J. (2022). An insight on the advancements of biological technologies in the bioremediation of textile effluents. *Urban Water Journal*, 19(5), 468–480. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2030369>
- Ricaczeski, C., El Akkari Sallum, E., Soccol, C. R., Helscher Candeco, E., Luísa Cerri, M., Bittencourt Sydney, E., & Teixeira de Abreu Pietrobelli, J. M. (2025). Optimized production of ligninolytic enzymes by immobilized *Phanerochaete chrysosporium* in a lab-scale bioreactor. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*. <https://doi.org/10.1080/10826068.2025.2478408>
- Rivero, J. J., Tutora, H., María, :, Cadenas, P., & De Ciencias, F. (n.d.). *TÍTULO: FTALOCIANINAS: SÍNTESIS Y APLICACIONES*.
- Roberto, J., Reyes, G., González Ramírez, C. A., & Castro-Rosas, J. (n.d.). *Consortios biológicos diseñados para la producción de lacasas y eliminación de colorantes*. Retrieved September 29, 2025, from www.reibci.org
- Saikia, S., Yadav, M., Hoque, R. A., & Yadav, H. S. (2023). Bioremediation mediated by manganese peroxidase – An overview. *Biocatalysis and Biotransformation*, 41(3), 161–173. <https://doi.org/10.1080/10242422.2022.2113517>
- Scopus - Document details - Decolorization of reactive dyes by the white rot fungus *Phanerochaete velutina* in presence of Zn and ZnO nanoparticles | Signed in. (n.d.). Retrieved March 28, 2025, from <https://scopus.proxyusc.elogim.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85193275322&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=614719492176f55067c1a869fe364f3e&sot=a&sdt=a&s=TITLE-ABS-KEY%28bioremediation+AND+dyes+AND+white+AND+rot+AND+fungi%29&sl=66&sessionSearchId=614719492176f55067c1a869fe364f3e&relpos=3>
- Sen, S. K., Raut, S., & Raut, S. (2023). Mycoremediation of anthraquinone dyes from textile industries: a mini-review. *BioTecnología*, 104(1), 85. <https://doi.org/10.5114/BTA.2023.125088>
- Shah, H., Yusof, F., & Alam, M. Z. (2023). A new technique to estimate percentage decolorization of synthetic dyes on solid media by extracellular laccase from white-rot fungus. *Bioremediation Journal*, 27(1), 66–74. <https://doi.org/10.1080/10889868.2021.1984197>
- Singh, G. B., Vinayak, A., Mudgal, G., & Kesari, K. K. (2024). Azo dye bioremediation: An interdisciplinary path to sustainable fashion. *Environmental Technology & Innovation*, 36, 103832. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2024.103832>
- Stefanía, A., Trujillo, D., Alexander, J., Forero, J., Amilcar, J., Insuasti, P., Sulay, E., & Muñoz, M. (n.d.). *Degradación de índigo carmín por hongos de pudrición blanca Indigo carmine degradation by white rot fungi*.
- Svobodová, K., & Novotný, Č. (2018). Bioreactors based on immobilized fungi: bioremediation under non-sterile conditions. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(1), 39–46. <https://doi.org/10.1007/S00253-017-8575-Z>
- Tania, K. A., Das, E. J., Tahsin, M., & Bhuiyan, M. A. R. (2024). Investigating the optimum conditions for azo dye (methyl orange and methyl red) decolorization from aqueous solution using oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*): a mycoremediation approach. *Bioremediation Journal*. <https://doi.org/10.1080/10889868.2024.2381015>
- Torres-Farradá, G., Thijs, S., Rineau, F., Guerra, G., & Vangronsveld, J. (2024). White Rot Fungi as Tools for the Bioremediation of Xenobiotics: A Review. *Journal of Fungi*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/jof10030167>
- Vista de Degradación de efluentes de los procesos de teñido con colorantes directos empleando métodos*

- biotecnológicos* | *Innmoda Lab.* (n.d.). Retrieved September 29, 2025, from <https://revistas.sena.edu.co/index.php/innlab/article/view/2110/3343>
- Vista de Selección de hongos con capacidad degradativa de colorantes sintéticos.* (n.d.). Retrieved September 29, 2025, from <https://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/118/174>
- Wang, Z., Weng, C., Wu, X., Deng, W., & Yang, Y. (2025). Effective decolorization and detoxification of single and mixed dyes of different structural types by a laccase LAC-Yang1 purified from *Pleurotus ostreatus* strain Yang1. *International Journal of Biological Macromolecules*, 319, 145161. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.145161>
- Yanto, D. H. Y., Anita, S. H., & Solihat, N. N. (2024). Enzymatic degradation and metabolic pathway of acid blue 129 dye by crude laccase from newly isolated *Trametes hirsuta* EDN 082. *Biocatalysis and Biotransformation*, 42(2), 129–139. <https://doi.org/10.1080/10242422.2022.2138360>
- Zafar, S., Bukhari, D. A., & Rehman, A. (2022). Azo dyes degradation by microorganisms – An efficient and sustainable approach. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(12), 103437. <https://doi.org/10.1016/J.SJBS.2022.103437>
- Zafiu, C., Küpcü, S., & Kähkönen, M. A. (2022). Method to determine the decolorization potential of persistent dyes by white rot fungi by colorimetric assays. *MethodsX*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101885>
- Zafiu, C., Part, F., Ehmoser, E. K., & Kähkönen, M. A. (2021). Investigations on inhibitory effects of nickel and cobalt salts on the decolorization of textile dyes by the white rot fungus *Phanerochaete velutina*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112093>
- Zouari-Mechichi, H., Benali, J., Alessa, A. H., Hadrich, B., & Mechichi, T. (2024). Efficient Decolorization of the Poly-Azo Dye Sirius Grey by *Coriolopsis gallica* Laccase-Mediator System: Process Optimization and Toxicity Assessment. *Molecules* 2024, Vol. 29, Page 477, 29(2), 477. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES29020477>