Evaluación Comparativa del potencial de los Hongos para la Producción de Tintes Naturales en la Industria Textil

Autor
Pablo Andrey González Victoria

Título por el que opta
Microbiólogo

Directores
PhD Andrés Jenuer Matta Miramar

PhD Diana Carolina Zambrano

Grupo de Investigación
GIMIA

Línea de Investigación
Microbiología industrial y bioprocesos

Facultad de ciencias básicas
Programa de microbiología
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2026

IMPACTOS

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

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Científico	Revisión bibliográfica sistemática (42 artículos) y análisis comparativo sobre el potencial de los pigmentos fúngicos en la industria textil.	Comunidad científica, estudiantes, investigadores en microbiología y biotecnología.
Tecnológico	Identificación y análisis de técnicas de producción (fermentación, extracción, optimización e ingeniería genética).	Industria textil, sector biotecnológico, centros de investigación.
Ambiental	Propuesta de uso de pigmentos fúngicos como alternativa sostenible para reducir la contaminación por colorantes sintéticos.	Medio ambiente, industria textil, sociedad en general.
Económico	Evaluación del uso de residuos agroindustriales como sustratos de bajo costo (economía circular).	Industria agroindustrial, empresas biotecnológicas, sector productivo.
Responsabilidad social	Generación de conocimiento sobre tintes más seguros, no tóxicos y amigables con la salud humana.	Consumidores, trabajadores del sector textil.

EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL POTENCIAL DE LOS HONGOS PARA LA PRODUCCIÓN DE TINTES NATURALES EN LA INDUSTRIA TEXTIL

Pablo Andrey Gonzalez Victoria[1] (pablo.gonzalez00@usc.edu.co); Andres Jenuer Matta Miramar[2] (andres.matta00@usc.edu.co); Diana Carolina Zambrano[3] (Diana.Zambrano@endeporte.edu.co)

[1]Grupo de Investigación GIMIA, Programa de Microbiología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

La preocupación por el impacto ambiental de los tintes sintéticos está llevando a la industria textil a buscar alternativas más sostenibles. Los pigmentos producidos por hongos han atraído un gran interés debido a sus orígenes renovables, biodegradabilidad y capacidad para producir compuestos con propiedades funcionales adicionales. Sin embargo, el alcance de las especies de hongos con potencial de producción de tintes naturales está muy fragmentado y es difícil realizar un análisis extenso y seleccionar los microorganismos más prometedores para aplicaciones industriales.

Esta revisión sistemática se llevó a cabo para analizar la evidencia científica disponible y identificar qué hongos en la industria tienen el mayor potencial como productores de tintes naturales para la industria textil. Para ello, empleamos la metodología PRISMA 2020 mediante búsqueda bibliográfica en las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect. Se seleccionaron 42 artículos científicos como resultado de los criterios de inclusión y exclusión.

Encontramos que géneros como *Talaromyces, Monascus, Penicillium* y *Chlorociboria* muestran pigmentos notables con diferentes tonalidades y propiedades funcionales, incluyendo actividad antimicrobiana, actividad antioxidante y protección contra los rayos UV. También encontramos que los residuos agroindustriales como sustratos de cultivo pueden utilizarse para aumentar la sostenibilidad y reducir el costo de producción. Sigue siendo un desafío encontrar soluciones para la estabilidad de los pigmentos, la producción de micotoxinas en algunas especies, así como la escala industrial de producción.

Concluimos que los pigmentos fúngicos proporcionan una alternativa prometedora para el desarrollo de tintes sostenibles en la industria textil y también pueden desarrollarse en el sector textil. Sin embargo,

queda por hacer investigación para optimizar los procesos de producción y la seguridad biológica, así como la aplicación de pigmentos fúngicos a escala industrial.

Palabras clave: *Pigmentos fúngicos, tintes naturales, industria textil, biotecnología, sostenibilidad*

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE POTENTIAL OF FUNGI FOR THE PRODUCTION OF NATURAL DYES IN THE TEXTILE INDUSTRY

ABSTRACT

Concerns about the environmental impact of synthetic dyes are driving the textile industry to seek more sustainable alternatives. Pigments produced by fungi have attracted significant interest due to their renewable origins, biodegradability, and ability to produce compounds with additional functional properties. However, the range of fungal species with potential for natural dye production is highly fragmented, making it difficult to conduct a comprehensive analysis and select the most promising microorganisms for industrial applications.

This systematic review was conducted to analyze the available scientific evidence and identify which fungi in the industry have the greatest potential as producers of natural dyes for the textile industry. To this end, we employed the PRISMA 2020 methodology through a literature search in the Scopus, Web of Science, and ScienceDirect databases. Forty-two scientific articles were selected based on the inclusion and exclusion criteria.

We found that genera such as *Talaromyces, Monascus, Penicillium*, and *Chlorociboria* exhibit notable pigments with different shades and functional properties, including antimicrobial activity, antioxidant activity, and UV protection. We also found that agro-industrial waste can be used as culture substrates to increase sustainability and reduce production costs. Finding solutions for pigment stability, mycotoxin production in certain species, and industrial-scale production remains a challenge.

We conclude that fungal pigments offer a promising alternative for the development of sustainable dyes in the textile industry and can also be further developed within the textile sector. However, further research is needed to optimize production processes and biosafety, as well as the application of fungal pigments on an industrial scale.



Keywords: *Fungal pigments, natural dyes, textile industry, biotechnology, sustainability*

HIGHLIGHTS

- Los hongos filamentosos presentan alta capacidad para producir pigmentos naturales con aplicaciones textiles sostenibles.
- El uso de residuos agroindustriales mejora la eficiencia económica y ambiental de la producción.
- Los pigmentos fúngicos presentaron propiedades bioactivas adicionales, como actividad antimicrobiana y protección UV.

1. INTRODUCCIÓN

La industria textil es una de las más perjudiciales para el medio ambiente debido al uso de tintes sintéticos y productos químicos, principalmente derivados del petróleo. Durante el proceso de teñido, se producen grandes cantidades de efluentes con compuestos tóxicos, metales pesados y sustancias difíciles de degradar que pueden ser tóxicas para el ecosistema, el medio ambiente y la salud humana (De Farias et al., 2023; Rao et al., 2017). Por esta razón, en los últimos años, ha habido un creciente interés por encontrar alternativas a la contaminación producida por esta industria para desarrollar opciones más sostenibles para la industria textil con el fin de reducir esto. En ese sentido, los pigmentos naturales producidos por microorganismos también fueron de interés para nosotros porque se cultivan de manera controlada y segura y no están sujetos a factores ambientales. Los hongos filamentosos se caracterizan particularmente por la capacidad de crear una amplia variedad de metabolitos secundarios pigmentados, incluidos carotenoides, antraquinonas, melaninas y azafilonas. Los pigmentos también son de colores muy brillantes y tienen diferentes propiedades biológicas que serían de interés industrial (Kalra et al., 2020; Elkhateeb & Daba, 2023; Toma et al., 2023). A diferencia de los pigmentos de las plantas, los hongos pueden cultivarse durante todo el año en sistemas fermentativos bien controlados que no se ven alterados durante el ciclo de producción y pueden cultivarse de manera continua y escalable. Además, muchos estudios también han encontrado que los hongos pueden crecer en desechos agroindustriales y alimentarse en términos de suministro de alimentos para la utilización de desechos, así como para el reciclaje sostenible de desechos, y, por lo tanto, modelos de

economía circular (Basto et al., 2025; Oliveira et al., 2023). Esto no solo reduce los costos de producción, sino también el impacto ambiental de la producción de desechos orgánicos.

Como tal, varios estudios han reportado resultados prometedores en géneros como *Talaromyces, Monascus, Penicillium, Aspergillus* y *Chlorociboria* con buena estabilidad, afinidad a diferentes fibras textiles y otras propiedades útiles como actividad antimicrobiana, propiedades antioxidantes y protección UV (Venil et al., 2020; Umesh et al., 2023; Machuca et al., 2024). Tales propiedades han estimulado el interés por los pigmentos fúngicos más allá del color y son potencialmente los más adecuados para aplicaciones textiles. Sin embargo, debido a la diversidad de especies, condiciones de cultivo y experimentales, la información disponible no es uniforme y los hongos con mayor potencial no se identifican fácilmente para su uso textil. Además, aunque hay numerosos estudios sobre pigmentos sostenibles, productivos y funcionales, no hay consenso sobre cuáles son las especies más productivas, biológicamente seguras y comercialmente viables. Para entender mejor esto, necesitamos realizar una revisión sistemática.

2. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló como una revisión sistemática de la literatura siguiendo los lineamientos de la metodología PRISMA 2020, la cual permite garantizar transparencia, reproducibilidad y rigor científico en la selección de estudios (Page et al., 2021).

El enfoque del estudio fue con el enfoque PCC (Población–Concepto–Contexto), donde:

- Población: hongos productores de pigmentos
- Concepto: producción, optimización y caracterización de pigmentos
- Contexto: aplicación en la industria textil

2.1. Búsqueda bibliográfica y criterios de inclusión y exclusión.

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos científicas de alto impacto como ScienceDirect, Scopus y Web of Science, mediante la combinación de palabras clave empleando operadores booleanos (AND, OR). El objetivo fue identificar estudios relacionados con la producción de pigmentos fúngicos y su aplicación como tintes naturales en la industria textil, siguiendo el marco PCC (Población–Concepto–Contexto)

En ScienceDirect, la ecuación de búsqueda fue:
(“fungal pigments” OR “natural dyes” OR “filamentous fungi” OR “microbial pigments”) AND (“fermentation” OR “bioproduction” OR “optimization” OR “culture medium”) AND (“textile” OR “fabric” OR

“dyeing”).
Se obtuvieron inicialmente 4,854 registros, que tras aplicar el filtro de años (2009–2025) se redujeron a 1,922. Posteriormente, al filtrar por acceso abierto, se obtuvieron 606 resultados y, finalmente, al restringir a artículos científicos, se seleccionaron 183 estudios.

En Scopus, la ecuación fue:
(“fungal pigments” OR “microbial colorants” OR “natural textile dyes”) AND (“production” OR “fermentation” OR “optimization”) AND (“textile industry”).
Se obtuvieron 823 registros iniciales; tras aplicar filtros por año (2020–2025), idioma (inglés/español) y tipo de documento, se redujeron a 115 artículos.

En Web of Science, la ecuación fue:
(“fungal pigments” OR “natural dyes”) AND (“fermentation” OR “pigment production”) AND (“textile”).
Se identificaron 4,201 registros iniciales, que tras aplicar filtros de año, acceso abierto, idioma y tipo de documento, se redujeron a 1,023 estudios.

En total, se consolidaron aproximadamente 1,321 registros. Posteriormente, se eliminaron 40 duplicados mediante gestores bibliográficos como Mendeley y Zotero, obteniendo 1,281 artículos para el proceso de cribado por título y resumen.

Durante esta fase, se aplicaron los siguientes criterios de inclusión:

- Publicaciones entre 2009 y 2025
- Idioma inglés o español
- Artículos originales con datos experimentales
- Acceso a texto completo
- Relación directa o indirecta con la producción o aplicación de pigmentos fúngicos en textiles

Como criterios de exclusión se consideraron:

- Estudios sin enfoque en pigmentos fúngicos
- Investigaciones sin aplicación textil
- Artículos de revisión, capítulos de libro o resúmenes

Tras el cribado inicial, 180 artículos fueron seleccionados para lectura de texto completo. Posteriormente, se excluyeron 138 estudios por no cumplir completamente con los criterios establecidos (principalmente por falta de aplicación textil o ausencia de datos experimentales). Finalmente, se incluyeron 42 artículos en la revisión sistemática (Figura 1).

La extracción de datos se realizó de manera estructurada, considerando variables como: especie fúngica, tipo de pigmento producido, sustrato empleado, condiciones de fermentación, técnicas de extracción, rendimiento, estabilidad del color y aplicaciones textiles. Esta información permitió desarrollar un análisis crítico orientado a identificar tendencias, ventajas, limitaciones y oportunidades en el uso de pigmentos fúngicos como alternativa sostenible en la industria textil.

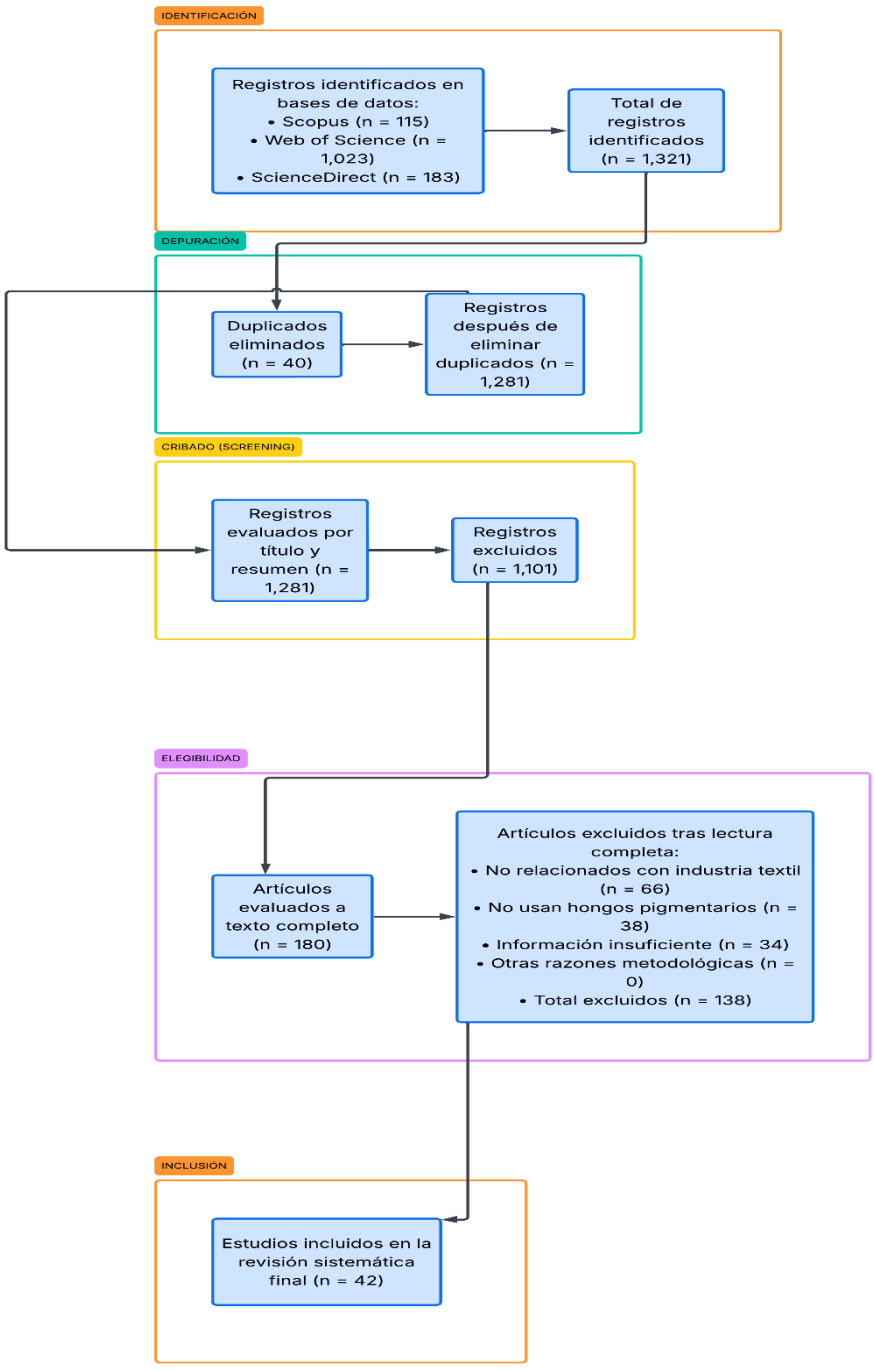

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA. Fuente (Lucidchart)

3. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

3.1 Potencial biotecnológico de los hongos

Se pudo observar que los hongos filamentosos constituyen una fuente altamente eficiente de pigmentos naturales, con ventajas claras frente a fuentes vegetales debido a su rápida tasa de crecimiento, independencia estacional y adaptabilidad a sistemas de producción controlados (Kalra et al., 2020; Basto et al., 2025).

Tabla 1. Ventajas comparativas de los pigmentos fúngicos frente a sintéticos

Criterio	Pigmentos fúngicos (naturales)	Tintes sintéticos	Ventaja clave	Referencias
Origen	Biológico, renovable	Derivados del petróleo	Sostenibilidad	(Kalra et al., 2020; Rao et al., 2017)
Impacto ambiental	Bajo, eco-compatibles	Alto, contaminantes	Reducción de contaminación	(Basto et al., 2025; De Farias et al., 2023)
Biodegradabilidad	Alta	Baja	Menor persistencia ambiental	(Kalra et al., 2020; Oliveira et al., 2023)
Toxicidad	Baja o nula (dependiendo de la cepa)	Alta (carcinogénicos, tóxicos)	Mayor seguridad	(Venil et al., 2020; Elkhateeb & Daba, 2023)
Propiedades funcionales	Antimicrobianas, antioxidantes, UV	Generalmente ausentes	Valor agregado	(Umesh et al., 2023; Mani et al., 2024)
Producción	Escalable en biorreactores	Industrial establecida	Producción controlada	(Lin & Xu, 2022)
Materia prima	Residuos agroindustriales	Químicos sintéticos	Economía circular	(Oliveira et al., 2023; Basto et al., 2025)

Criterio	Pigmentos fúngicos (naturales)	Tintes sintéticos	Ventaja clave	Referencias
Diversidad de colores	Alta (antraquinonas, carotenoides, azaphilonas)	Muy alta (amplia síntesis química)	Competitividad cromática	(Toma et al., 2023; Elkhateeb & Daba, 2023)
Requerimiento de mordientes	A veces necesario	No siempre necesario	Mejora potencial en desarrollo	(Hernández et al., 2020)
Costo	Variable (puede ser alto en extracción)	Generalmente bajo	En transición tecnológica	(Basto et al., 2025)

Análisis de la tabla 1

Dado que los pigmentos fúngicos se consideran sustitutos naturales de los tintes sintéticos, no es sorprendente que haya un creciente interés en desarrollar alternativas biológicas para la industria textil. El tinte sintético ha dominado el mercado durante más de un siglo debido a su bajo costo, diversidad de colores y facilidad de fabricación. Sin embargo, se ha demostrado que la producción y uso de tintes sintéticos tiene consecuencias ambientales negativas, como el uso de recursos no renovables y la liberación de compuestos tóxicos al medio ambiente (Rao et al., 2017; De Farias et al., 2023). La diferencia fundamental entre el tinte sintético y el fúngico es el origen de los pigmentos.

El tinte sintético se fabrica a partir de materiales petroquímicos. Por lo tanto, los pigmentos fúngicos se obtienen de microorganismos. Esta es la razón por la que el uso de pigmentos fúngicos no conduce a la dependencia de materias primas fósiles, sino que permite el desarrollo de un proceso más sostenible en línea con la bioeconomía actual (Kalra et al., 2020; Elkhateeb & Daba, 2023). Además de las ventajas ambientales de los pigmentos fúngicos, estos también son responsables de propiedades que rara vez se encuentran en los tintes sintéticos convencionales. Existen propiedades antimicrobianas, antioxidantes y fotoprotectoras de ciertos metabolitos pigmentados producidos por hongos y, por lo tanto, su inclusión en el producto textil final (Venil et al., 2020; Machuca et al., 2024). Esto es muy atractivo en el ámbito industrial, donde los consumidores desean productos con sostenibilidad y funcionalidad. Sin embargo, los pigmentos fúngicos todavía están limitados en su uso, ya que aún enfrentan las limitaciones de muchos factores que dificultan su uso generalizado.

Los principales problemas son la estabilidad de algunos colores frente a factores ambientales, la extracción y purificación y su afinidad por diferentes fibras textiles (Lin & Xu, 2022; Basto et al., 2025). Estas limitaciones son la razón por la cual, a pesar de sus ventajas ecológicas, los tintes sintéticos siguen siendo el pilar de la mayoría de las industrias. En general, hemos encontrado que los pigmentos fúngicos no deben verse simplemente como sustitutos ecológicos de los tintes sintéticos, sino como una nueva generación de tintes que pueden proporcionar propiedades funcionales y ambientales adicionales. Su aplicación a gran escala dependerá de la investigación biotecnológica para mejorar la productividad, fiabilidad y competitividad

económica de estos compuestos en comparación con las tecnologías existentes (Basto et al., 2025; Lin & Xu, 2022; Venil et al., 2020).

3.2 Diversidad de especies y pigmentos

Los hongos producen pigmentos de diferentes clases químicas, como carotenoides, antraquinonas y azaphilonas, lo que amplía su aplicabilidad en la industria textil (Toma et al., 2023; Elkhateeb & Daba, 2023).

Tabla 2. Principales hongos productores de pigmentos y características

Especie fúngica	Tipo de pigmento	Color producido	Ventaja principal	Aplicación textil	Referencia
Talaromyces atroroseus	Azaphilonas	Rojo / Rosa	Alta producción sin micotoxinas (seguridad industrial)	Teñido de algodón y lana	(Venil et al., 2020; Segato et al., 2025)
Monascus purpureus	Poliquétidos	Rojo / Naranja	Alto rendimiento y tradición industrial	Teñido de fibras naturales	(Kalra et al., 2020; Lin & Xu, 2022)
Penicillium brevicompactum	Mezcla de poliquétidos	Amarillo / Naranja	Uso eficiente de residuos agroindustriales	Teñido sostenible de algodón	(Basto et al., 2025; Venil et al., 2020)
Chlorociboria aeruginosa	Xilindeína	Azul-verdoso	Alta estabilidad UV y sin mordientes	Textiles técnicos y madera decorativa	(Zschätzsch et al., 2021; Machuca et al., 2024)
Scytalidium cuboideum	Draconina roja	Rojo intenso	Alta estabilidad en aceites naturales	Aplicaciones textiles ecológicas	(Agurto et al., 2020)
Fusarium oxysporum	Antraquinonas	Rojo / Púrpura	Alta afinidad por lana	Industria textil lanera	(Mwaheb et al., 2024; Toma et al., 2023)
Aspergillus terreus	Aspulvinonas	Amarillo	Producción con bioactividad (antioxidante)	Teñido funcional	(Chalakkara & Thomas, 2025)

Especie fúngica	Tipo de pigmento	Color producido	Ventaja principal	Aplicación textil	Referencia
Aspergillus niger	Melaninas / poliquétidos	Negro / Marrón	Alta producción y fácil cultivo	Teñido oscuro en textiles	(Toma et al., 2021)
Talaromyces albobiverticillius	Poliquétidos	Rojo	Producción a partir de residuos (economía circular)	Textiles con propiedades antimicrobianas	(Umesh et al., 2023)
Terana coerulea	Pigmentos fenólicos	Azul	Producción sostenible de colorantes azules	Industria textil innovadora	(Fernandes et al., 2025)
Penicillium europium	Pigmentos poliquétidos	Amarillo	Fácil extracción y caracterización	Aplicaciones textiles experimentales	(Khan et al., 2021)
Geomyces sp.	Pigmentos rojos	Rojo	Regulación genética de secreción pigmentaria	Producción controlada de tintes	(Du et al., 2025)
Penicillium murcianum	Pigmentos antifúngicos	Variable	Propiedad antimicrobiana natural	Textiles con protección biológica	(Gutierrez et al., 2022)
Talaromyces aurantiacus	Pigmentos rojos	Rojo brillante	Producción estimulada por luz LED	Aplicaciones en impresión textil	(Gong et al., 2022)
Aspergillus unguis	Naftazarinas	Rojo / Marrón	Producción de nuevos compuestos pigmentarios	Desarrollo de nuevos colorantes	(Alkersh et al., 2026)

Análisis de la tabla 2

Los estudios incluidos en esta revisión indican que la capacidad de producir pigmentos se encuentra de gran Los estudios en esta revisión muestran que la capacidad de producir pigmentos está ampliamente distribuida entre varios tipos de hongos y representa la amplia diversidad del metabolismo de estos microorganismos. Sin embargo, la importancia de cada especie no radica solo en la intensidad o variedad de colores producidos, sino también en su rendimiento, estabilidad del pigmento, seguridad biológica y viabilidad económica (Kalra et al., 2020; Lin & Xu, 2022).

La especie más estudiada es *Monascus purpureus*, que es uno de los microorganismos productores de pigmentos más importantes a nivel industrial. Debido a su capacidad para generar pigmentos rojos, naranjas y amarillos con altos rendimientos y su uso en varios campos biotecnológicos, fue su uso más común. La

producción de citrinina simultáneamente con él contrasta con la aplicación industrial, ya que es muy tóxica y también perjudicial para la salud humana (Venil et al., 2020; Lin & Xu, 2022). Este ejemplo demuestra que una alta productividad no significa necesariamente aplicación industrial. Por otro lado, las especies pertenecientes al género *Talaromyces* han ganado gran interés, ya que pueden producir pigmentos similares a *Monascus* sin las mismas toxicidades. Muchos estudios han indicado que estos hongos son uno de los mejores modelos para la producción de tintes naturales para la industria textil porque son seguros, estables y productivos (Chadni et al., 2017; Gong et al., 2022; Segato et al., 2025). También están las especies como *Chlorociboria aeruginascens* y *Terana coerulea*, que son muy inusuales ya que producen pigmentos azulados y azul verdosos. Para hacer que los colores azules naturales estén disponibles para muchas industrias, necesitamos encontrarlos y tales especies podrían ser una fuente importante de diversificación de colores en la industria textil (Zschätzsch et al., 2021; Fernandes et al., 2025).

Otro punto importante en la literatura es que muchos de estos hongos pueden cultivarse utilizando residuos agroindustriales como fuente de nutrientes. Esto los hace mucho más baratos y, por lo tanto, pueden utilizar subproductos agrícolas que normalmente se desechan para apoyar la economía circular y la sostenibilidad ambiental (Oliveira et al., 2023; Umesh et al., 2023; Basto et al., 2025). Los resultados de los estudios que hemos estudiado muestran que no hay una sola especie que se considere superior en todas las áreas. Algunas tienen un rendimiento muy alto, otras son muy buenas en seguridad, estabilidad o diversidad de colores. Por lo tanto, solo se puede elegir el microorganismo más adecuado para cualquier aplicación industrial. Desde una perspectiva global, géneros como *Talaromyces, Monascus, Penicillium* y *Chlorociboria* son actualmente algunos de los candidatos más prometedores para liderar el desarrollo de pigmentos naturales para el desarrollo de la industria textil (Venil et al., 2020; Elkhateeb & Daba, 2023; Basto et al., 2025).

3.3 Aplicaciones textiles y propiedades funcionales

Una ventaja clave de los pigmentos fúngicos es que no solo aportan color, sino también propiedades funcionales adicionales (Venil et al., 2020).

Tabla 3. Propiedades funcionales de pigmentos fúngicos

Microorganismo / Pigmento	Tipo de fibra textil	Aplicación	Propiedad funcional	Beneficio industrial	Referencias
Talaromyces spp. (azaphilonas)	Algodón, lana	Teñido textil	Antimicrobiana	Uso en textiles médicos (batas, vendajes)	(Umesh et al., 2023; Venil et al., 2020)

Microorganismo / Pigmento	Tipo de fibra textil	Aplicación	Propiedad funcional	Beneficio industrial	Referencias
Penicillium spp. (policétidos)	Algodón, lino	Coloración natural	Antioxidante	Mayor durabilidad del material	(Mani et al., 2024; Elkhateeb & Daba, 2023)
Chlorociboria aeruginosa (xilindeína)	Algodón, poliéster	Teñido sin mordientes	Protección UV	Ropa con protección solar integrada	(Zschätzsch et al., 2021; Machuca et al., 2024)
Scytalidium cuboideum (draconin red)	Algodón, seda	Teñido ecológico	Alta estabilidad	Mayor resistencia al lavado y luz	(Agurto et al., 2020)
Fusarium spp. (antraquinonas)	Lana	Teñido profundo	Alta afinidad textil	Mejor fijación del color	(Mwaheb et al., 2024)
Monascus spp. (rojos naturales)	Lana, seda	Coloración tradicional	Bioactividad leve	Aplicaciones textiles funcionales	(Venil et al., 2020)
Aspergillus spp. (varios pigmentos)	Algodón	Teñido industrial	Actividad antimicrobiana	Reducción de bacterias en textiles	(Chalakkara & Thomas, 2025)
Talaromyces albobiverticillius	Seda, algodón	Teñido sostenible	Antibacteriana y antioxidante	Textiles funcionales de alto valor	(Umesh et al., 2023)

Análisis de la tabla 3

Los estudios de investigación realizados sobre los pigmentos fúngicos muestran que estos pigmentos tienen otras propiedades además de ser tintes textiles. Antes del descubrimiento de los pigmentos fúngicos, la función principal de los tintes era dar color y mejorar la apariencia de los materiales. Recientemente, se ha establecido que muchos de los pigmentos producidos por hongos también tienen propiedades biológicas que proporcionarían beneficios adicionales al producto terminado y, por lo tanto, aumentarían su valor tecnológico y comercial (Venil et al., 2020; Elkhateeb & Daba, 2023). La actividad antimicrobiana en la literatura ha demostrado ser una gran parte de los pigmentos fúngicos. Se ha encontrado que algunos pigmentos fúngicos inhiben el crecimiento de microorganismos patógenos como *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*, microorganismos conocidos por estar involucrados en infecciones y contaminación de superficies textiles (Gutierrez et al., 2022; Alyami et al., 2025).

Esto es muy importante para la producción de textiles hospitalarios, ropa deportiva y prendas para uso prolongado, en el contexto de microorganismos que pueden afectar el material. También hay actividad antioxidante en algunos pigmentos, lo cual es favorable para el uso a largo plazo y duradero de materiales

textiles, por lo que se tendría que investigar más a fondo. Algunos autores sugieren que podría llevar a una vida útil más larga y mejor estabilidad funcional (Mani et al., 2024; Alyami et al., 2025). Otra característica que ha recibido más atención es la naturaleza fotoprotectora de algunos pigmentos naturales. La protección contra la radiación ultravioleta es de gran importancia en ropa deportiva, ropa para actividades al aire libre y textiles técnicos.

Recientemente, algunos metabolitos pigmentados producidos por hongos pueden absorber o bloquear parte de la radiación UV y así mejorar las propiedades protectoras de las fibras textiles (Machuca et al., 2024; Hamaamin et al., 2025). Desde la perspectiva industrial, esto es una gran ventaja sobre muchos tintes sintéticos convencionales que se utilizan principalmente con fines estéticos. Por lo tanto, desarrollar textiles multipropósito basados en pigmentos fúngicos será una de las áreas de más rápido crecimiento de la biotecnología textil en la próxima década (Basto et al., 2025; Venil et al., 2020).

3.4 Producción y rendimiento

El rendimiento de producción de pigmentos fúngicos depende de múltiples factores, especialmente del tipo de microorganismo, el sustrato y las condiciones de fermentación (Lin & Xu, 2022).

Tabla 4. Rendimiento de producción según especie

Microorganismo	Tipo de pigmento	Sustrato utilizado	Condiciones de fermentación	Rendimiento reportado	Referencias
Monascus purpureus	Azaphilonas (rojo)	Residuos de uva / tusa de maíz	SSF, 30 °C, pH 5–6	20–22.5 g/L	(Venil et al., 2020; Basto et al., 2025)
Talaromyces atroroseus	Rojo (tipo Monascus)	Medios líquidos optimizados	SmF, 28–30 °C, pH controlado	Alta absorbancia (~90%)	(Chadni et al., 2017; Gong et al., 2022)
Penicillium brevicompactum	Amarillo/naranja	Suero de leche + tusa de maíz	SmF con inmovilización, 25–28 °C	Producción 2–10 veces mayor	(Basto et al., 2025; Umesh et al., 2023)
Rhodotorula glutinis	Carotenoides	Melaza	SmF, pH 4–5, 28–30 °C	185 mg/L	(Toma et al., 2023)

Microorganismo	Tipo de pigmento	Sustrato utilizado	Condiciones de fermentación	Rendimiento reportado	Referencias
Xanthophyllomyces dendrorhous	Astaxantina	Medio sintético enriquecido	Fed-batch, control de oxígeno	404.78 mg/L	(Toma et al., 2023; Lin & Xu, 2022)
Blakeslea trispora	β-caroteno	Medio optimizado	SmF, control de aireación	17 g/L	(Toma et al., 2023)
Fusarium oxysporum	Antraquinonas	Medio bajo en nitrógeno	SmF, estrés nutricional	Alta afinidad en lana	(Mwaheb et al., 2024)
Talaromyces albobiverticillius	Rojo	Cáscaras de piña	SSF, 28 °C	Alto rendimiento + bioactividad	(Umesh et al., 2023)
Chlorociboria aeruginascens	Xilindeína (azul-verde)	Madera	Cultivo sólido, baja humedad	Producción estable	(Zschätzsch et al., 2021)
Aspergillus terreus	Amarillo (aspulvinona)	Medio líquido	SmF, 30 °C	Producción estable	(Chalakkara & Thomas, 2025)

Análisis de la tabla 4

Es bien sabido que el rendimiento productivo es clave para la viabilidad industrial de cualquier proceso biotecnológico. Para los pigmentos fúngicos, los estudios revisados indican que la cantidad de pigmento obtenido depende de la especie utilizada, el sustrato, los nutrientes y las condiciones de fermentación (Lin & Xu, 2022; Basto et al., 2025). Los hallazgos para *Monascus purpureus* y *Blakeslea trispora* tienen uno de los rendimientos más altos reportados en la literatura y tienen altas concentraciones que son adecuadas para aplicaciones industriales a gran escala (Venil et al., 2020; Toma et al., 2023). Pero el rendimiento absoluto no debería ser el único factor considerado, la seguridad, la estabilidad y la facilidad de procesamiento también son importantes en la rentabilidad del sistema de producción.

Uno de los aspectos más interesantes en estudios recientes es el uso de residuos agroindustriales como sustratos fermentativos. Para una variedad de especies fúngicas, la melaza, el suero, el bagazo agrícola y las cáscaras de frutas han demostrado ser fuentes óptimas de nutrientes que reducen el costo de producción (Oliveira et al., 2023; Umesh et al., 2023). La perspectiva es especialmente relevante en nuestro mundo actual donde la sostenibilidad y la valorización de residuos son las principales prioridades para la industria biotecnológica. Además, varios estudios han demostrado que parámetros como el pH, la temperatura, la aireación y la disponibilidad de nutrientes pueden aumentar significativamente la síntesis de pigmentos. La fermentación alimentada por lotes y el tratamiento de estrés nutricional han demostrado ser efectivos para estimular los procesos metabólicos en metabolitos secundarios (Lin & Xu, 2022; Basto et al., 2025).

Los resultados sugieren que el éxito de la producción de pigmentos fúngicos en el sector industrial depende no solo de la selección de cepas productivas, sino también de las condiciones óptimas de cultivo y también del uso de opciones para el uso eficiente de recursos para un crecimiento económico y ambiental óptimo.

3.5 Medios de cultivo y técnicas de producción

La eficiencia en la producción de pigmentos fúngicos depende en gran medida del método de cultivo y del tipo de sustrato utilizado (Basto et al., 2025).

Tabla 5. Medios y técnicas de producción

Método de cultivo	Tipo de sustrato	Descripción	Ventajas	Desventajas	Referencias
Fermentación sumergida (SmF)	Medios líquidos (melaza, glucosa, extracto de levadura, suero de leche)	Cultivo en fase líquida con control de pH, temperatura y aireación	Fácil control de parámetros, alta reproducibilidad, escalable industrialmente	Alto consumo de agua, menor concentración de pigmento en algunos casos	(Lin & Xu, 2022; Basto et al., 2025)
Fermentación en estado sólido (SSF)	Residuos agroindustriales (tusa de maíz, cáscaras, bagazo)	Crecimiento sobre sustratos sólidos con baja humedad	Alta concentración de pigmentos, menor costo, simula ambiente natural	Difícil control de variables (temperatura, humedad), menor escalabilidad	(Umesh et al., 2023; Kalra et al., 2020)
Fermentación con micelio inmovilizado	Soportes sólidos (tusa de maíz, esponjas, matrices poliméricas)	Células fijadas en soportes que permiten reutilización	Mayor rendimiento, reutilización del biomaterial, estabilidad del proceso	Costos iniciales más altos, complejidad técnica	(Umesh et al., 2023; Basto et al., 2025)
Cultivo en medios sintéticos	Glucosa, peptona, medios definidos	Medios químicamente definidos para crecimiento controlado	Alta reproducibilidad, control experimental	Alto costo, baja sostenibilidad	(Rao et al., 2017; Venil et al., 2020)

Método de cultivo	Tipo de sustrato	Descripción	Ventajas	Desventajas	Referencias
Cultivo en residuos agroindustriales	Suero de leche, melaza, cáscaras de frutas, rastrojos	Uso de desechos como fuente de nutrientes	Bajo costo, sostenible, economía circular	Variabilidad en composición, requiere pretratamiento	(Oliveira et al., 2023; Basto et al., 2025)
Fermentación fed-batch	Sustratos líquidos con alimentación gradual	Adición controlada de nutrientes durante el proceso	Mayor productividad, evita limitación de nutrientes	Mayor complejidad operativa	(Lin & Xu, 2022)

Análisis de la tabla 5

El sistema de cultivo es una de las elecciones más estratégicas para la producción de pigmentos fúngicos, ya que es muy importante para el rendimiento, los costos operativos y la sostenibilidad del proceso. Según los estudios realizados en la literatura, no existe un método que sea el más preferido al final, por lo que hay diferentes ventajas y desventajas que deben evaluarse según las necesidades de producción (Lin & Xu, 2022). A nivel industrial, la fermentación sumergida sigue siendo el método más predominante debido a su facilidad de control sobre el pH, la temperatura y la aireación, y permite un resultado reproducible y la escalabilidad de los procesos, importante para la producción comercial de pigmentos (Basto et al., 2025; Rao et al., 2017).

El sistema también es muy demandante de agua y requiere mucha energía, lo que puede afectar su sostenibilidad a largo plazo. La fermentación en estado sólido también ha ganado atención debido a su capacidad para crear mayores pigmentos utilizando menos agua y aprovechando los residuos agroindustriales como sustratos de crecimiento. Esto es especialmente relevante para países con alta productividad agrícola donde los materiales lignocelulósicos baratos están fácilmente disponibles (Kalra et al., 2020; Umesh et al., 2023). Además, la literatura está viendo un creciente interés en adoptar tecnologías avanzadas como la inmovilización celular y los sistemas de alimentación por lotes, que pueden ayudar a optimizar la productividad y la estabilidad de los cultivos y prolongar la vida de los sistemas de fermentación (Lin & Xu, 2022; Basto et al., 2025).

Aunque el desarrollo de la producción de pigmentos fúngicos aún no está bajo el control de la evolución tecnológica, está claro que debe ser promovido por sistemas híbridos que probablemente logren alta productividad, sostenibilidad ambiental y prosperidad económica para competir con los tintes sintéticos en la industria textil.

3.6 Seguridad y toxicidad

Uno de los principales desafíos en el uso de pigmentos fúngicos es la posible producción de micotoxinas (Venil et al., 2020).

Tabla 6. Riesgos y soluciones

Hongo / Género	Pigmento producido	Micotoxina asociada	Riesgo potencial	Estrategias de mitigación	Referencias
Monascus spp.	Azaphilonas (rojo, naranja)	Citrinina	Nefrotoxicidad y citotoxicidad	Ingeniería genética (CRISPR), selección de cepas no toxigénicas	(Venil et al., 2020; Lin & Xu, 2022)
Penicillium spp.	Amarillos, verdes, rojos	Ocratoxina, patulina	Toxicidad renal y hepática	Control de fermentación y selección de cepas seguras	(Elkhateeb & Daba, 2023; Alyami et al., 2025)
Aspergillus spp.	Amarillos, marrones	Aflatoxinas	Alta toxicidad, carcinogénica	Uso de cepas GRAS y monitoreo estricto	(Toma et al., 2021; Alkersh et al., 2026)
Fusarium spp.	Antraquinonas	Fumonisinas, tricotecenos	Toxicidad sistémica	Optimización de condiciones de cultivo	(Mwaheb et al., 2024)
Talaromyces spp.	Rojos (tipo Monascus)	Generalmente no produce toxinas relevantes	Bajo riesgo	Uso industrial preferido por seguridad	(Segato et al., 2025; Venil et al., 2020)
Chlorociboria spp.	Xilindeína (azul-verde)	No reportadas	Muy bajo riesgo	Producción controlada	(Zschätzsch et al., 2021)
Scytalidium cuboideum	Draconin red	No reportadas	Bajo riesgo	Uso en medios controlados	(Agurto et al., 2020)

Análisis de la tabla 6

La seguridad es uno de los desafíos más importantes para la aplicación industrial de los pigmentos fúngicos. A pesar de las ventajas ambientales y funcionales de estos compuestos, el hecho de que algunos hongos puedan producir micotoxinas es una preocupación legítima desde el punto de vista de la salud y la regulación (Venil et al., 2020; Elkhateeb & Daba, 2023). Según este estudio, las especies de los géneros *Monascus, Aspergillus* y *Penicillium* pueden producir pigmentos y metabolitos tóxicos como citrinina,

aflatoxinas u ocratoxinas a la vez. Están asociados con nefrotoxicidad, hepatotoxicidad y potencial carcinogenicidad dependiendo de la exposición y concentración (Lin & Xu, 2022; Alyami et al., 2025).

Esto muestra que el potencial industrial de un microorganismo no se basa solo en su capacidad productiva. Además, la seguridad del pigmento y el cumplimiento de las regulaciones para cada sector también cuentan. Así, *Talaromyces, Chlorociboria* y *Scytalidium* han atraído interés debido a la ausencia o baja producción de compuestos tóxicos en la literatura (Segato et al., 2025; Zschätzsch et al., 2021). Los avances recientes en biología molecular están abriendo nuevas oportunidades para abordar estas limitaciones. Las herramientas de edición CRISPR-Cas9 pueden modificar las vías metabólicas y eliminar genes involucrados en la producción de micotoxinas sin afectar la producción de pigmentos (Lin & Xu, 2022).

Estas tecnologías podrían desempeñar un papel crítico en el desarrollo de cepas más seguras y competitivas. Así que, aunque la producción de micotoxinas sigue siendo una limitación importante, el progreso biotecnológico actual hace posible utilizar de manera segura los pigmentos fúngicos en aplicaciones textiles e industriales.

3.7 Impacto ambiental

Los pigmentos fúngicos presentan menor toxicidad y mayor biodegradabilidad en comparación con los sintéticos (De Farias et al., 2023).

Tabla 7. Impacto ambiental comparativo

Característica	Tintes sintéticos	Tintes naturales (fúngicos)	Referencias
Toxicidad para humanos	Alta: pueden ser carcinogénicos, mutagénicos y causar irritaciones cutáneas	Baja: generalmente no tóxicos y seguros para contacto dérmico	(De Farias et al., 2023; Venil et al., 2020)
Presencia de compuestos peligrosos	Contienen metales pesados, aminas aromáticas y compuestos azoicos	Carecen de compuestos altamente tóxicos; metabolitos naturales	(Rao et al., 2017; Elkhateeb & Daba, 2023)
Impacto en la salud	Asociados a alergias, problemas respiratorios y efectos crónicos	Menor riesgo; algunos presentan propiedades bioactivas beneficiosas	(Alyami et al., 2025; Mani et al., 2024)

Característica	Tintes sintéticos	Tintes naturales (fúngicos)	Referencias
Biodegradabilidad	Baja: persistentes en el ambiente, difícil degradación	Alta: fácilmente biodegradables por acción microbiana	(Kalra et al., 2020; Basto et al., 2025)
Impacto ambiental	Alta contaminación de aguas por efluentes tóxicos	Bajo impacto ambiental; compatibles con procesos ecológicos	(Modi et al., 2025; Oliveira et al., 2023)
Tratamiento de residuos	Requieren procesos costosos y complejos	Más fáciles de tratar y menos contaminantes	(Aydogan & Arslan, 2015; Lin & Xu, 2022)
Persistencia en ecosistemas	Alta: pueden bioacumularse	Baja: degradación natural rápida	(Rao et al., 2017; Kalra et al., 2020)

Análisis de la tabla 7

Uno de los argumentos más fuertes detrás de los pigmentos fúngicos es su potencial para reducir el impacto ambiental de la industria textil. La producción y uso de tintes sintéticos se han considerado como una de las fuentes de contaminación más dañinas debido a la presencia de compuestos químicos persistentes en los efluentes que en algunos casos son tóxicos para los ecosistemas acuáticos (Rao et al., 2017; De Farias et al., 2023). En contraste, los pigmentos fúngicos se desarrollan biológicamente y pueden ser mucho más compatibles con la sostenibilidad ambiental. Esta estrategia fortalece el modelo de economía circular y convierte materiales de bajo valor económico en productos de uso industrial (Umesh et al., 2023; Basto et al., 2025).

Pero como señalan algunos autores, los pigmentos fúngicos no solo se derivan de la naturaleza; el consumo de energía durante los procesos de fermentación, extracción y purificación, así como la eficiencia general de la cadena de producción, también deben tenerse en cuenta para una evaluación ambiental completa (Lin & Xu, 2022; De Farias et al., 2023). Actualmente, hay mucha evidencia científica de que los pigmentos fúngicos son una alternativa ambiental para reducir el impacto ambiental de la industria textil. Pero el desarrollo de tales procesos de producción aún está por realizarse y se deben hacer estudios para evaluar su impacto económico y ambiental a largo plazo (Venil et al., 2020; Basto et al., 2025).

.3.8 Análisis crítico y comparación con la literatura

La literatura científica confirma el potencial de los pigmentos fúngicos como una alternativa sostenible a los tintes sintéticos en la industria textil. La mayoría de los estudios examinados proporcionan buena información sobre el origen renovable, la biodegradabilidad y la posibilidad de producción a través de procesos biotecnológicos controlados (Venil et al., 2020; Kalra et al., 2020; Basto et al., 2025). Sin embargo,

al compararlos con investigaciones publicadas por diferentes autores, el desarrollo tecnológico y la viabilidad industrial de estos pigmentos no son los mismos para diferentes especies, así como las condiciones de producción. Por un lado, los géneros *Monascus, Talaromyces, Penicillium* y *Chlorociboria* han sido identificados como los más prometedores para tintes naturales. Sin embargo, los criterios utilizados para determinar el potencial varían de un estudio a otro. Algunos autores se centran en el rendimiento productivo y la intensidad del color producido (Lin & Xu, 2022; Toma et al., 2023), mientras que otros consideran que la seguridad biológica, la estabilidad del pigmento y la sostenibilidad del proceso son igualmente importantes para el uso industrial futuro (Segato et al., 2025; Elkhateeb & Daba, 2023).

Las diferencias entre este enfoque y otros indican claramente que la evaluación del potencial biotecnológico de una especie no puede restringirse a su capacidad de producción. Lo mismo ocurre con el uso de residuos agroindustriales para sustratos fermentativos como una de las mejores opciones para mejorar la sostenibilidad económica y ambiental de los procesos de producción. Con este fin, la productividad industrial de los residuos orgánicos se mejora significativamente y los costos operativos se reducen al usar melaza, cáscaras de frutas, bagazo agrícola o suero como sustratos fermentativos (Oliveira et al., 2023; Umesh et al., 2023; Basto et al., 2025). Sin embargo, la composición de los residuos en cuestión puede afectar la reproducibilidad de los resultados y llevar a una variación en la calidad y cantidad de pigmento obtenido.

Este es un inconveniente importante que sería útil para futuras investigaciones y estandarización. Otro hallazgo interesante es que los pigmentos fúngicos poseen propiedades funcionales adicionales. Es bien sabido que estos compuestos tienen propiedades antimicrobianas, antioxidantes y fotoprotectoras y, por lo tanto, pueden ser utilizados en el sector médico, textiles deportivos y técnicos (Machuca et al., 2024; Mani et al., 2024; Alyami et al., 2025). Sin embargo, gran parte de la evidencia disponible se ha realizado en condiciones de laboratorio y es por eso que la prueba experimental de las propiedades aún está lejos de ser confirmada en la práctica y en la industria comercial y deportiva. Por otro lado, la seguridad sigue siendo el tema más importante para el despliegue a gran escala de los pigmentos fúngicos. Algunas especies tienen perfiles toxicológicos favorables, mientras que otras como *Monascus, Aspergillus* y *Penicillium* pueden producir micotoxinas que limitan su uso sin ningún control de calidad (Venil et al., 2020; Lin & Xu, 2022). Se ha demostrado que la ingeniería genética y la edición genómica son herramientas prometedoras para el desarrollo de cepas más seguras en el futuro que puedan lograr una alta productividad de pigmentos, pero no produzcan metabolitos tóxicos (Lin & Xu, 2022). Sin embargo, en entornos industriales, todavía enfrentan desafíos regulatorios y económicos.

Comparando la investigación en este documento, está claro que hasta la fecha el problema principal no es la capacidad de los hongos para producir pigmentos para los estudios de laboratorio, sino la transición de los laboratorios a gran escala. Aunque ha habido avances científicos significativos en los últimos años, todavía hay pocos trabajos que evalúan la estabilidad de los pigmentos durante los procesos industriales, la reproducibilidad a gran escala, los costos de producción y la aceptación comercial de estos productos (Basto et al., 2025; Segato et al., 2025).

Por esta razón, la investigación futura debería centrarse en la integración de esfuerzos de optimización biotecnológica, evaluación económica y validación industrial para que los pigmentos fúngicos se transformen en un producto textil comercialmente viable. Basado en la investigación científica disponible,

los pigmentos fúngicos demuestran claramente ser una de las opciones más prometedoras para la transición hacia un sistema de producción textil más sostenible. Sin embargo, su consolidación como reemplazos reales de los tintes sintéticos dependerá de la capacidad del trabajo futuro para resolver los problemas de seguridad, estandarización, escalabilidad y competitividad económica de estos bioproductos.

3.9 Limitaciones del estudio

La presente revisión presenta algunas limitaciones, entre ellas:

- Variabilidad en metodologías de los estudios analizados
- Diferencias en condiciones experimentales
- Escasez de estudios a escala industrial

No obstante, los resultados obtenidos permiten establecer una base sólida para futuras investigaciones.

1. CONCLUSIONES

Para este propósito, examinamos las especies fúngicas más estudiadas, los métodos de producción y las propiedades funcionales de los pigmentos obtenidos, sus principales inconvenientes y las perspectivas futuras para el uso de pigmentos fúngicos en la industria textil. Desde el punto de vista ambiental, los pigmentos fúngicos son una alternativa sostenible a los tintes sintéticos ya que son de origen renovable, biodegradables y pueden producirse a partir de desechos agroindustriales, lo que resulta en un menor impacto ambiental y una mejor economía circular. También encontramos que géneros como *Talaromyces, Monascus, Penicillium* y *Chlorociboria* tienen sus propios beneficios en términos de ser biotecnológicamente productivos. Sin embargo, los pigmentos fúngicos aún no están listos para la aplicación industrial en términos de estabilidad del pigmento, producción de micotoxinas en algunas especies, costo de procesamiento y escala de los sistemas de producción. En general, los pigmentos fúngicos parecen ser un buen candidato para el sector textil sostenible.

2. AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera. Su respaldo tanto emocional como financiero ha sido fundamental para alcanzar este logro, brindándome la motivación y las herramientas necesarias para continuar incluso en los momentos más desafiantes. También mi sincero agradecimiento a mis profesores, quienes con su conocimiento, orientación y compromiso ayudaron significativamente a mi formación académica. Agradezco a mis amigos de la universidad, quienes me han acompañado durante este camino y, por último, a mis tutores de tesis por guiarme en transcurso de la elaboración de esta misma.

3. DECLARACION DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los autores declaran que no han usado herramientas de inteligencia artificial (IA) en la creación de este articulo

4. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

.

Agurto, M. E. P., Gutierrez, S. M. V., Van Court, R. C., Chen, H., & Robinson, S. C. (2020). Oil-based fungal pigment from *Scytalidium cuboideum* as a textile dye. *Journal of Fungi, 6*(2), 53. https://doi.org/10.3390/jof6020053

Ahmed, K. A., El-Hennawi, H. M., & Wehaidy, H. R. (2025). Production of natural pigment from *Bacillus subtilis* KU710517 using agro-industrial wastes and application in dyeing of wool fabrics. *Processes, 13*(11), 3453. https://doi.org/10.3390/pr13113453

Alkersh, B. M., Ghozlan, H. A., Sabry, S. A., Hassan, S. W. M., & El-Sikaily, A. (2026). Extraction and characterization of a novel glycosylated naphthazarin pigment from mangrove *Aspergillus unguis* AUMC15225. *Scientific Reports, 16*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-026-43500-0

Alyami, A. A., Alabdalall, A. H., Chakroun, H., Aldakeel, S. A., Albarrag, A. M., Kotb, E., & Al-Zahrani, F. (2025). Production, biological characterization, and applications of natural pigments from filamentous fungi. *Brazilian Journal of Biology, 85*, e298448. https://doi.org/10.1590/1519-6984.298448

Aydogan, M. N., & Arslan, N. P. (2015). Removal of textile dye reactive black 5 by the cold-adapted, alkali- and halotolerant fungus *Aspergillus flavipes* MA-25 under non-sterile conditions. *Desalination and Water Treatment, 56*(8), 2258–2266. https://doi.org/10.1080/19443994.2014.960463

Basto, B., Da Silva, N. R., Teixeira, J. A., & Silvério, S. C. (2025). Biotechnological production of natural pigments for textile dyeing. *Frontiers in Microbiology, 16*, 1677799. https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1677799

Chadni, Z., Rahaman, M. H., Jerin, I., Hoque, K., & Reza, M. A. (2017). Extraction and optimisation of red pigment production as secondary metabolites from *Talaromyces verruculosus* and its potential use in textile industries. *Mycology, 8*(1), 48–57. https://doi.org/10.1080/21501203.2017.1302013

Chalakkara, A. A., & Thomas, T. (2025). Production kinetics and bioactivity study of aspulvinone pigment from *Aspergillus terreus* STCP01 for natural colourant applications. *Bioresource Technology Reports, 29*, 102042. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102042

De Farias, N. O., De Albuquerque, A. F., Santos, A. D., Almeida, G. C. F., Freeman, H. S., Räisänen, R., & De Aragão Umbuzeiro, G. (2023). Is natural better? An ecotoxicity study of anthraquinone dyes. *Chemosphere, 343*, 140174. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140174

Du, J., Zhao, Y., Meng, L., Zhu, X., Xu, X., Wang, J., Liu, L., Zhang, X., Kong, L., & Wang, N. (2025). Cell wall integrity pathway regulates red pigment secretion in Antarctic fungi *Geomyces* wnf-18c. *Food Microbiology, 133*, 104890. https://doi.org/10.1016/j.fm.2025.104890

Elkhateeb, W., & Daba, G. (2023). Fungal pigments: Their diversity, chemistry, food and non-food applications. *Applied Microbiology, 3*(3), 735–751. https://doi.org/10.3390/applmicrobiol3030051

Fernandes, I. P., Gonçalves, M., Bogalho, H., Goulart, Y., Heleno, S. A., & Calhelha, R. (2025). Obtaining natural and sustainable blue dyes from the fungus *Terana coerulea* for textile application. *Phytochemistry Letters, 69*, 103257. https://doi.org/10.1016/j.phytol.2025.103257

Gong, X., Luo, H., Wu, X., Liu, H., Sun, C., & Chen, S. (2022). Production of red pigments by a newly isolated *Talaromyces aurantiacus* strain with LED stimulation for screen printing. *Indian Journal of Microbiology, 62*(2), 280–292. https://doi.org/10.1007/s12088-022-01008-x

Gutierrez, P. V., Hernández, V. A., Sagredo, N., & Robinson, S. C. (2022). Colorants produced by *Penicillium murcianum* are a natural moldicide. *Coatings, 12*(6), 821. https://doi.org/10.3390/coatings12060821

Gutierrez, S. V., & Robinson, S. (2017). Microscopic analysis of pigments extracted from spalting fungi. *Journal of Fungi, 3*(1), 15. https://doi.org/10.3390/jof3010015

Somos calidad,
somos USC

Gutierrez, S. V., Gutierrez, P. V., Godinez, A., Pittis, L., Huber, M., Stanton, S., & Robinson, S. (2016). Feasibility of coloring bamboo with fungal pigments. *Coatings, 6*(3), 37. https://doi.org/10.3390/coatings6030037

Hamaamin, O. K., Ghareeb, H. O., & Mohammed, S. J. (2025). Eco-friendly enhancement of polyvinyl alcohol films via dye doping. *Scientific Reports, 15*(1), 28891. https://doi.org/10.1038/s41598-025-14206-6

Hernández, V., Galleguillos, F., Sagredo, N., & Machuca, Á. (2020). Color fastness of fabrics after dyeing with fungal dyes. *International Journal of Clothing Science and Technology, 33*(2), 232–240. https://doi.org/10.1108/ijcst-12-2019-0196

Kalra, R., Conlan, X. A., & Goel, M. (2020). Fungi as a potential source of pigments. *Frontiers in Chemistry, 8*, 369. https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00369

Khan, A. A., et al. (2021). Extraction and identification of fungal pigment from *Penicillium europium*. *Journal of King Saud University - Science, 33*(4), 101437. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101437

Lin, L., & Xu, J. (2022). Production of fungal pigments: Molecular processes and applications. *Journal of Fungi, 9*(1), 44. https://doi.org/10.3390/jof9010044

Machuca, Á., Hernández, V. A., Deramond, C., & Contreras-Machuca, P. (2024). The colorful fungi of Chilean forests. *Advances in Applied Microbiology*, 1–40. https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2024.05.003

Maharana, A. K. (2016). Extracellular pigment producing *Penicillium pinophilum*. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, 8*(10), 164. https://doi.org/10.22159/ijpps.2016v8i10.13441

Mani, I., et al. (2024). Bioprospecting efficacy and textile dyeing of a novel fungal pigment. *Indian Journal of Microbiology, 64*(2), 618–634. https://doi.org/10.1007/s12088-024-01211-y

Modi, A., et al. (2025). Fungal consortium mediated biodegradation of dyes. *Journal of Hazardous Materials Advances, 18*, 100705. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100705

Mwaheb, M. A., et al. (2024). *Fusarium verticillioides* pigment production. *BMC Biotechnology, 24*(1), 84. https://doi.org/10.1186/s12896-024-00909-7

Naz, T., et al. (2022). Screening of natural dyes from fungal species. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences B, 58*(4), 39–48. https://doi.org/10.53560/ppasb(58-4)684

Oliveira, L. A., et al. (2023). Colorant production by Amazonian fungi. *Journal of Basic Microbiology, 64*(2). https://doi.org/10.1002/jobm.202300444



Rao, M. P. N., Xiao, M., & Li, W. (2017). Fungal and bacterial pigments. *Frontiers in Microbiology, 8*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01113

Segato, T. C. M., et al. (2025). Toxicity evaluation of fungal pigments. *Food and Chemical Toxicology, 200*, 115394. https://doi.org/10.1016/j.fct.2025.115394

Shanmugam, S., Rajasekaran, P., & Thanikal, J. V. (2009). Dye decolourization using fungi. *Desalination and Water Treatment, 4*, 143–147. https://doi.org/10.5004/dwt.2009.369

Toma, M. A., et al. (2021). Isolation of pigment-producing *Aspergillus niger*. *Foods, 10*(6), 1280. https://doi.org/10.3390/foods10061280

Toma, M. A., et al. (2023). Fungal pigments: Carotenoids and applications. *Journal of Fungi, 9*(4), 454. https://doi.org/10.3390/jof9040454

Umesh, M., et al. (2023). Valorization of pineapple peel waste for pigment production. *Environmental Research, 229*, 115973. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115973

Vaishally, Pal, S., Thyagarajan, K. R., & Shukla, S. P. (2025). Origin of crimson pigment from lac insect. *PNAS, 122*(25), e2501623122. https://doi.org/10.1073/pnas.2501623122

Van Brenk, B., & Wösten, H. A. (2021). Screening method for dye decoloration. *Journal of Microbiological Methods, 188*, 106301. https://doi.org/10.1016/j.mimet.2021.106301

Velmurugan, P., et al. (2009a). Natural pigment extraction for industrial applications. *Carbohydrate Polymers, 79*(2), 262–268. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.058

Velmurugan, P., et al. (2009b). Effect of light on pigment production. *Journal of Bioscience and Bioengineering, 109*(4), 346–350. https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2009.10.003

Venil, C. K., et al. (2020). Fungal pigments for textile dyeing. *Journal of Fungi, 6*(2), 68. https://doi.org/10.3390/jof6020068

Venkatachalam, M., et al. (2018). Production of pigments from marine fungi. *Journal of Food Composition and Analysis, 70*, 35–48. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.03.007

Verma, H., et al. (2023). Optimization of dyeing with fungal pigments. *Sustainable Chemistry and Pharmacy, 35*, 101192. https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101192

Zschätzsch, M., et al. (2021). Production of natural colorants by fermentation. *Engineering in Life Sciences, 21*(3–4), 270–282. https://doi.org/10.1002/elsc.202000079



Somos calidad,
somos USC