

Biosíntesis y potencial aplicación de pigmentos fúngicos

Francisco Patlán Álvarez^{1a}, Oswaldo Emmanuel Hernández Gama^{1b}, Johan Axel Alfaro Valadez^{1c}, José Salvador Hernández Navarro^{1d}, Ivanna Torres Hernández², Alma Rosa Corrales Escobosa³.

¹[Licenciatura en Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato. Dirección de correo: ^a[f.patlanalvarez@ugto.mx], ^b[oe.hernandezgama@ugto.mx], ^c[ja.alfarovaladez@ugto.mx], ^d[js.hernandeznavarro@ugto.mx]

²[Licenciatura en Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato] Dirección de correo: [i.torreshernandez@ugto.mx]

³[Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] Dirección de correo: [alma_rce@ugto.mx]

Resumen

A nivel industrial, los pigmentos sintéticos son ampliamente utilizados para elaborar una gran cantidad de materiales (plásticos, textiles, cosméticos, alimentos, etc.) debido a sus propiedades fisicoquímicas como estabilidad, permanencia y síntesis a bajo costo. Sin embargo, debido a su persistencia y difícil eliminación, generan un alto impacto al medio ambiente. Debido a esto, se han buscado alternativas sustentables en fuentes naturales que presenten la misma aplicabilidad y que logren un menor impacto ambiental. Uno de los grandes exponentes como productores de pigmentos naturales son los hongos, los cuales son capaces de producir una amplia gama de tonalidades provenientes de diversas estructuras químicas producto de su metabolismo secundario. Esta revisión bibliográfica se enfocó en la descripción de los aspectos generales de la obtención de pigmentos fúngicos, incluida la descripción de las clases de moléculas que los producen, las especies fúngicas reportadas como productoras de pigmentos, las condiciones fisicoquímicas de su biosíntesis a nivel laboratorio e industrial, la extracción, aislamiento y la caracterización, así como sus posibles aplicaciones. Es importante señalar que debido a la gran diversidad fúngica y por lo tanto de rutas metabólicas, así como la influencia en las condiciones de cultivo en la producción de pigmentos y los métodos de extracción para de los mismos, la caracterización y optimización de estos sigue siendo un área de desarrollo en diversas investigaciones tanto a nivel científico como industrial.

Palabras clave: Pigmentos fúngicos, hongos, biosíntesis, metabolitos secundarios.

Abstract

At an industrial level, synthetic pigments are widely used to make many materials (plastics, textiles, cosmetics, food, etc.) due to their physicochemical properties such as stability, permanence and synthesis at low cost. However, due to their persistence and difficult elimination, they have a high impact on the environment. Due to this, sustainable alternatives have been sought in natural sources that present the same applicability and that achieve a lower environmental impact. One of the great exponents as producers of natural pigments are fungi, which can produce a wide range of tones from various chemical structures resulting from their secondary metabolism. This bibliographic review is focused on the description of the general aspects of obtaining fungal pigments, including the description of the classes of molecules that produce them, the fungal species reported as producers, the physicochemical conditions of their biosynthesis at laboratory and industrial level, extraction, isolation and characterization, as well as its possible applications. It is important to note that due to the great fungal diversity and therefore of metabolic routes, as well as the influence on the culture conditions on the production of pigments and the extraction methods for them, the characterization and optimization of these continues to be an area of development in various investigations both at a scientific and industrial level.

Introducción

La producción de colorantes sintéticos representa un área industrial muy importante en todo el mundo debido a sus excelentes propiedades en cuanto a disolución, amplia gama de colores que se pueden obtener y resistencia a tratamientos propios de los procesos de fabricación, así como bajos costos de producción. Sin embargo, muchos de estos compuestos se caracterizan porque pueden ser potentes agentes carcinógenos o mutagénicos y altamente resistentes a la degradación, por lo que su eliminación resulta difícil por tratamientos convencionales; además, durante su uso industrial (principalmente la textil), hay liberación de grandes cantidades de efluentes, convirtiéndose en un problema de contaminación (Kishor et al., 2021). Debido a ello, se ha realizado la búsqueda de alternativas sustentables que no tengan tantas repercusiones en la naturaleza y/o en los organismos.

Una alternativa viable en la producción de pigmentos es utilizar de fuentes naturales como plantas, algas y hongos. En la naturaleza existe una gran biodiversidad de hongos pobremente caracterizada que se encuentran distribuidos en diferentes hábitats, lo que representa un gran potencial en la búsqueda de pigmentos naturales. Los hongos filamentosos se destacan entre otros organismos por su capacidad para producir un amplio espectro de productos de interés industrial (principalmente alimenticio y/o farmacéutico) bajo una variedad de condiciones y sustratos. Entre otras ventajas se encuentra su facilidad de cultivo en el laboratorio y escalabilidad a nivel piloto o de planta (Valenzuela-Gloria et al., 2021). Por ello, el estudio a nivel molecular y bioquímico de este grupo de microorganismos representa un gran interés tanto científico, industrial y económico.

Los colorantes o pigmentos fúngicos son considerados producto de su metabolismo secundario, y dependiendo del género/especie o de las condiciones ambientales pueden producir una gran variedad de colores. Dichos compuestos son generados a razón de condiciones adversas o de estrés en la que se encuentra determinado microorganismo, con el fin de mejorar su supervivencia en el medio ambiente (Gmoser, Ferreira, Lennartsson, & Taherzadeh, 2017). Entre los géneros destacados que producen pigmentos se destacan *Neurospora*, *Monascus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Talaromyces*, *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Microsporum*, entre otros. El objetivo de esta revisión bibliográfica se enfocó en la descripción de la caracterización de pigmentos fúngicos y posibles aplicaciones, en particular, a los hongos perteneciente a los géneros de *Penicillium* y *Talaromyces*.

Desarrollo

Pigmentos fúngicos

La producción de pigmentos a través de hongos ha dado lugar a un creciente desarrollo científico e industrial en los últimos años, con lo cual se ha ahondado en la caracterización e identificación de los compuestos que logran ser sintetizados por este reino. Los pigmentos producidos por los hongos abarcan una amplia gama de colores y consta de diversas estructuras químicas principalmente del tipo carotenoides y/o policétidos. Las coloraciones y algunas clases de moléculas son resumidas en la **figura 1**.

Carotenoides

Los carotenoides son terpenoides coloreados sintetizados a partir de la ruta de isoprenoides. Ellos son biosintetizados como hidrocarburos (carotenos) y como derivados oxigenados de carotenos (xantofilas). El color de los carotenoides está determinado por la cadena de polienos. Es necesario entre siete dobles enlaces conjugados para la absorción de luz en la región espectral visible (400–600 nm). El aumento del sistema de dobles enlaces conjugados en un carotenoide acíclico cambia el color de amarillo a naranja y rojo brillante a rojo oscuro en una molécula de 40 carbonos.

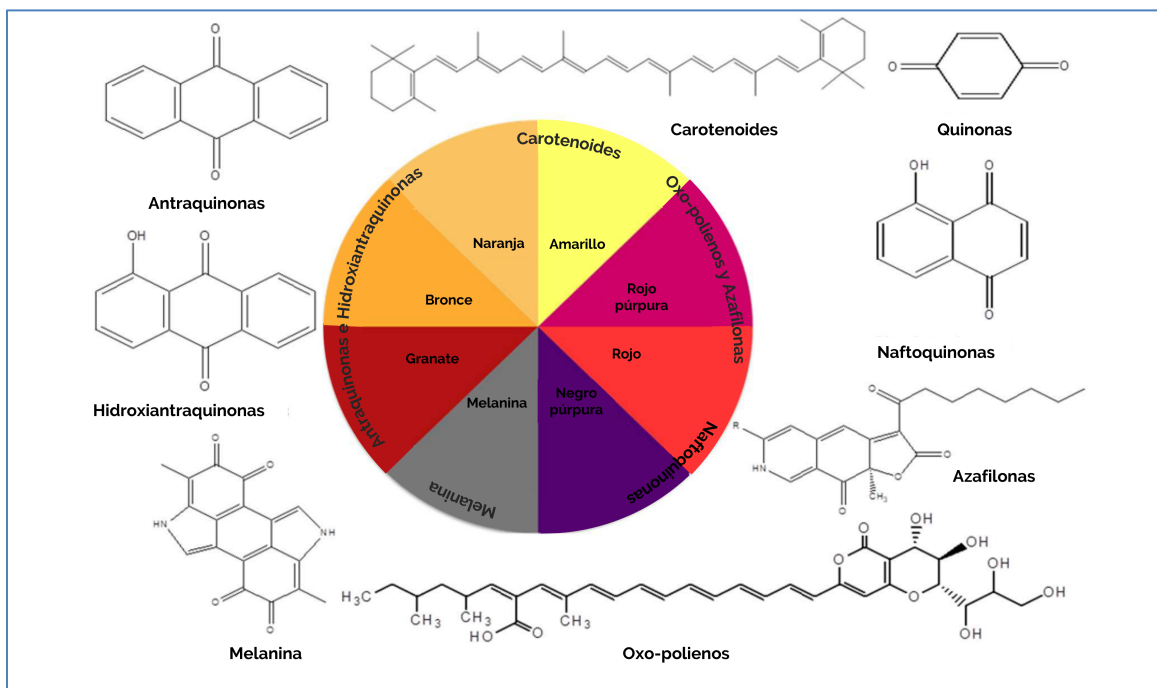


Figura 1. Diferentes coloraciones producidas por diversas clases de compuestos. Esquema recuperado y adaptado al español, de: (Kalra, Conlan, & Goel, 2020).

- **β -caroteno:** es un pigmento orgánico, de la familia de los carotenos, con color característico anaranjado intenso. La forma estructural de este tipo de compuestos se caracteriza por ser sintetizado bioquímicamente por ocho unidades de isopreno y, por lo tanto, la presencia de 40 carbonos.
- **Astaxantinas:** pigmento de la familia de los carotenoides perteneciente a la serie específica de los terpenos. Como parte de esta familia se presenta como un pigmento liposoluble coloreado. Posee propiedades antioxidantes ya que no se convierte en vitamina A dentro del cuerpo humano, a diferencia de gran cantidad de carotenoides.
- **Licopenos:** compuesto que forma parte de los carotenos con pigmentación rojo brillante. Este pigmento, a pesar de ser un caroteno, no presenta actividad como vitamina A. Este compuesto funge como intermediario importante en la biosíntesis de muchos carotenoides responsables de pigmentaciones amarillas, naranjas o rojas, así como de la fotosíntesis y la foto-protección de organismos.

Policétidos

Los pigmentos de policétidos fúngicos están hechos de tetracétidos y octocétidos que tienen ocho unidades C_2 que dan lugar a la cadena de policétidos.

- **Antraquinonas:** compuesto derivado del antraceno. Se presenta como un polvo cristalino amarillento y que llega a variar a un color grisáceo claro hasta un gris verdusco. En condiciones normales es un compuesto sumamente estable.
- **Hidroxiantraquinonas:** compuesto derivado de las antraquinonas a través del reemplazo de un átomo hidrógeno por un grupo hidroxilo. Las coloraciones de este compuesto varían desde el rojo hasta amarillo dependiendo del solvente en el que se encuentre inmerso.
- **Naftoquinonas:** compuesto derivado del naftaleno. Posee un olor penetrante y presenta pigmentaciones amarillas. La estructura química de este compuesto llega a fungir como núcleo para distintos compuestos naturales, entre los cuales se encuentra la vitamina K.

- **Azaflonas:** pigmentos pertenecientes a la categoría de los policétidos. Se caracterizan principalmente por la presencia de grupos carbonilo y metileno alternados dentro de su estructura química. Estos compuestos han sido aislados e identificados, principalmente, en hongos terrestres como los pertenecientes al género *Monascus*, *Penicillium*, *Talaromyces*, entre otros.
- **Melaninas:** Este grupo de pigmentos generalmente son de color marrón oscuro o negro, consiste en compuestos hidrofóbicos cargados negativamente con alto peso molecular, producto principalmente de la hidroxilación y polimerización de varias sustancias fenólicas o indólicas, por lo tanto, melaninas forman un grupo bastante heterogéneo de biopolímeros. Dependiendo del microorganismo, así como el tipo y morfología celular se puede seguir diferentes rutas de biosíntesis de pigmentos.

En la **figura 2** se presentan algunos ejemplos de especies fúngicas reportadas que sintetizan pigmentos del tipo carotenoides (β -caroteno, Astaxantina, Licopeno) o policétidos (Antraquinonas, hidroxiantraquinonas, naftoquinonas y azofilonas). Entre ellas se incluye a los hongos de los géneros *Blakeslea*, *Rhodospordium*, *Rhodotorula*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Sclerotium*, *Sporidionolus*, *Phaffia*, *Haematococcus*, *Agrobacterium*, entre otras (Valenzuela-Gloria et al., 2021).

| Pigmentos producidos | | Especies Fúngica |
|----------------------|--|--|
| Carotenoides | β -carotenos | <i>Blakeslea trispora</i> ; <i>Rhodospordium</i> spp.; <i>Rhodotorula</i> spp.; <i>Penicillium</i> spp.; <i>Aspergillus giganteus</i> ; <i>Sclerotium</i> spp.; <i>Sporidionolus pararoseus</i> |
| | Astaxantinas | <i>Phaffia rhodozyma</i> ; <i>Haematococcus pluvalis</i> ; <i>Agrobacterium aurantiacum</i> |
| | Licopenos | <i>Blakeslea</i> spp.; <i>Rhodotorula</i> spp.; <i>Mucorales</i> spp.; <i>Phucomyces</i> spp. |
| Policétidos | Antraquinonas | <i>Aspergillus</i> spp.; <i>Eurotium</i> spp.; <i>Emericella</i> spp.; <i>Fusarium</i> spp.; <i>Penicillium</i> spp.; <i>Mycosphaella</i> spp.; <i>Microsporum</i> spp. |
| | Hidroxiantraquinonas | <i>Aspergillus</i> spp.; <i>Microsphaeropsis</i> spp.; <i>Gosmithia</i> spp.; <i>Trichoderma</i> spp.; <i>Verticillium</i> spp.; <i>Guignardia</i> spp.; |
| | Naftoquinonas | <i>Chlorociboria</i> spp.; <i>Monascus</i> spp.; <i>Trichoderma</i> spp.; <i>Fusarium</i> spp.; |
| | Azaflonas | <i>Monascus</i> spp.; <i>Penicillium</i> spp.; <i>Talaromyces</i> spp.; <i>Chaetomium</i> spp.; |
| Melaninas | <i>Cryptococcus neoformans</i> ; <i>Magnaporthe grisea</i> ; <i>Candida albican</i> | |

Figura 2. Pigmentos producidos y su especie fúngica. Recuperada y adaptada al español, de: (Valenzuela-Gloria et al., 2021).

De manera más específica, al estudiar el género *Penicillium*, se ha encontrado que es un importante productor de diversos pigmentos como el Arpink red™ (Natural red™), primer pigmento rojo en comercializarse, talaroconvolutin A-D, esclerotiorina, xantoepoína, atrovenetina y dihidrotricodimerol descubierto en diversas especies de este género. A su vez, se han identificado otras tantas moléculas que son producidas por el género *Talaromyces* el cual, al igual que *Penicillium*, es un gran productor de pigmentos, **figura 3**.

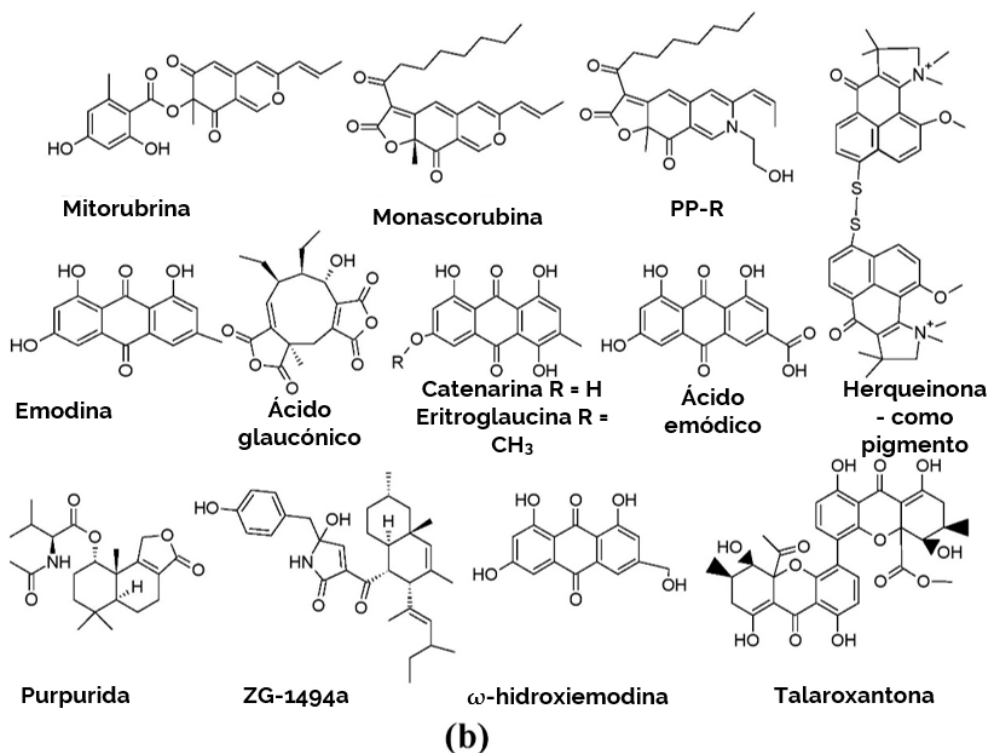
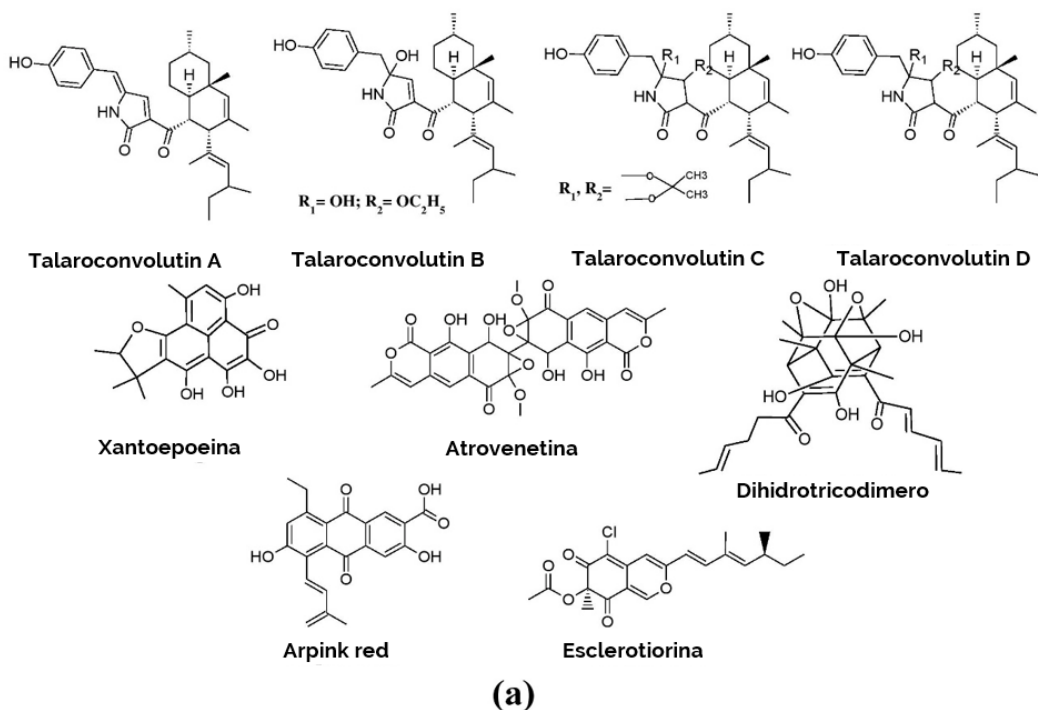


Figura. 3 Pigmentos de *Penicillium* (a) y *Talaromyces* (b). Diferentes pigmentos producidos por especies *Penicillium*. Gráfico recuperado y adaptado al español de (Lagashetti, Dufossé, Singh, & Singh, 2019).

Factores que influyen en la producción de pigmentos.

La producción de pigmentos a partir mediante procesos biotecnológicos ha demostrado ser una alternativa viable para la síntesis de estos compuestos. La biosíntesis de pigmentos está altamente influenciada por el tipo de cepa, las condiciones de fermentación, la composición del medio y los parámetros del proceso de cultivo de las especies fúngicas.

De manera general, las condiciones que típicamente estresan a las células, y que amenazan el crecimiento celular, desencadenan la producción de metabolitos secundarios y algunas veces la biosíntesis de estos pigmentos. Entre los parámetros a considerar para la producción de los pigmentos fúngicos, se han reportado: la luz, el pH, las fuentes de nitrógeno y carbono, la temperatura, los cofactores, los agentes tensoactivos, el nivel de oxígeno, el tipo y la morfología celular y el estrés oxidativo causado por las condiciones ambientales (Gmoser et al., 2017).

- **LUZ**
Los hongos reaccionan a la luz a través de diversas vías metabólicas al crecer en luz o después de percibir pulsos de luz. La cantidad y la actividad de las enzimas metabólicas y los niveles de metabolitos se regulan en respuesta al daño de la luz o en muchos casos en respuesta dependiente de la luz. De manera general, los mecanismos más estudiados son la producción de los carotenoides y las melaninas que tienen como función principal de proteger a los hongos del daño de la luz UV. Esta función fotoprotectora se ha caracterizado en los carotenoides debido a que son capaces de actuar como antioxidantes y desactivar las especies dañinas de oxígeno generadas por la radiación UV.
- **Nitrógeno y Carbono**
En la mayoría de las cepas de hongos filamentosos, limitar la disponibilidad de nitrógeno produce un aumento en la concentración de los pigmentos. Generalmente, fuentes complejas y orgánicas favorecen la producción de pigmentos en comparación con fuentes inorgánicas. También se ha propuesto que la relación carbono a nitrógeno (C / N) en el medio de cultivo es un factor importante además de la fuente de nitrógeno. En general, se ha informado que una relación C / N alta promueve pigmentación en muchos hongos, ya que esta condición limita el acceso de la célula al nitrógeno, el cual no puede ser utilizado para la síntesis de proteínas, y por ende provoca la activación del metabolismo secundario.
- **pH**
Los cambios de pH durante el crecimiento dependen principalmente de la fuente de nitrógeno y carbono en el medio. Condiciones de pH más ácidas favorecen a la acumulación de pigmentos, lo cual puede estar directamente asociado a las condiciones de estrés. También se ha observado que la producción máxima de pigmento está asociada con el efecto combinado tanto del pH, como de la temperatura en el medio de cultivo, y por lo tanto, un cambio en el pH puede causar diferentes rutas metabólicas, la ciclación, oxidación del sustrato y la regulación de procesos metabólicos y osmóticos, dando como resultado una amplia variedad de productos finales posibles.
- **Temperatura**
La temperatura es un factor que afecta de manera directa el crecimiento y morfología celulares, así como las diversas rutas metabólicas. Es un factor que puede ser empleado con facilidad para la regulación de procesos enzimáticos asociados con la producción de pigmento por la célula fúngica.
- **Cofactores**
Algunos de ellos tales como iones metálicos o sales tienen un impacto positivo en el metabolismo de los hongos gracias a su papel como macro y micronutrientes, tales como magnesio o calcio, o bien, hierro, manganeso, zinc y cobre, respectivamente. De manera particular, la síntesis de carotenoides es regulada por un mecanismo activación o inhibición por magnesio de enzimas caroteno génicas específicas.
- **Surfactantes**
Dependiendo de la cepa y surfactante empleados, los agentes tensoactivos (también conocidos como surfactantes) producidos naturalmente o adicionados al medio de cultivo, muestran efectos positivos en el metabolismo de los pigmentos intra y extracelulares, al reducir la tensión superficial y mejorar la capacidad para emulsionar y solubilizar sustratos hidrofóbicos. Entre los surfactantes más comúnmente empleados está el aceite de maíz, Tritón X-100, Tween-20, Span-20 y el aceite de oliva. Incluso se ha reportado que algunos surfactantes no iónicos pueden ser empleados para la formación de micelas en soluciones acuosas y lograr la secreción de pigmentos intracelulares hidrofóbicos, evitando así la degradación del pigmento y aumentando el rendimiento de extracción de este, considerando únicamente el caso de los pigmentos intracelulares, pero habría que considerar su aprovechamiento de manera similar para los producidos a nivel extracelular.

- **Nivel de oxígeno**
Su papel crucial se debe probablemente a su capacidad de actuar como aceptor final de electrones durante la fosforilación oxidativa y como sustrato de monooxigenasas, dado que ambos procesos están involucrados en la síntesis de metabolitos secundarios, tales como los carotenoides y, por lo tanto, es importante considerar que una buena oxigenación del medio es necesaria para lograr una producción óptima de los pigmentos.
- **Morfología**
.Los hongos filamentosos pueden adoptar diversas morfologías cuando se cultivan en medios sumergidos, ya sea en filamentos uniformes y largos o filamentos enredados en gránulos o grumos, o inclusive formas levaduriformes. De modo que, una alta concentración de micelio o filamentos enredados reduce considerablemente la nutrición homogénea del hongo, modifica la temperatura del medio o la disponibilidad de oxígeno.,
- **Estrés oxidativo**
Es sabido que, con el fin de sobrevivir y competir por la condiciones óptimas de crecimiento en el medio ambiente, los hongos son capaces de producir una amplia variedad de enzimas y metabolitos secundarios con actividades variadas, entre las cuales destaca la protección que ofrecen los carotenoides contra el estrés oxidativo al actuar como antioxidantes frente a las especies reactivas de oxígeno (ROS), extendiendo así el tiempo de vida de los hongos y participando activamente de manera sinérgica con otros antioxidantes en la conservación de la especie fúngica .

Todas estas variables influyen en la producción de pigmentación, por lo que es necesario considerar cuando se busca la optimización de las condiciones de cultivo para maximizar el rendimiento y escalar el sistema de producción a nivel industrial. cómo se ilustra en la **figura 4**. Adicionalmente, hay que considerar que la producción de pigmentos puede ser localizada en diversos compartimientos celulares de los hongos y acompañado por la producción de micotoxina, por lo es necesario llevar a cabo diferentes métodos de extracción y purificación de pigmentos.

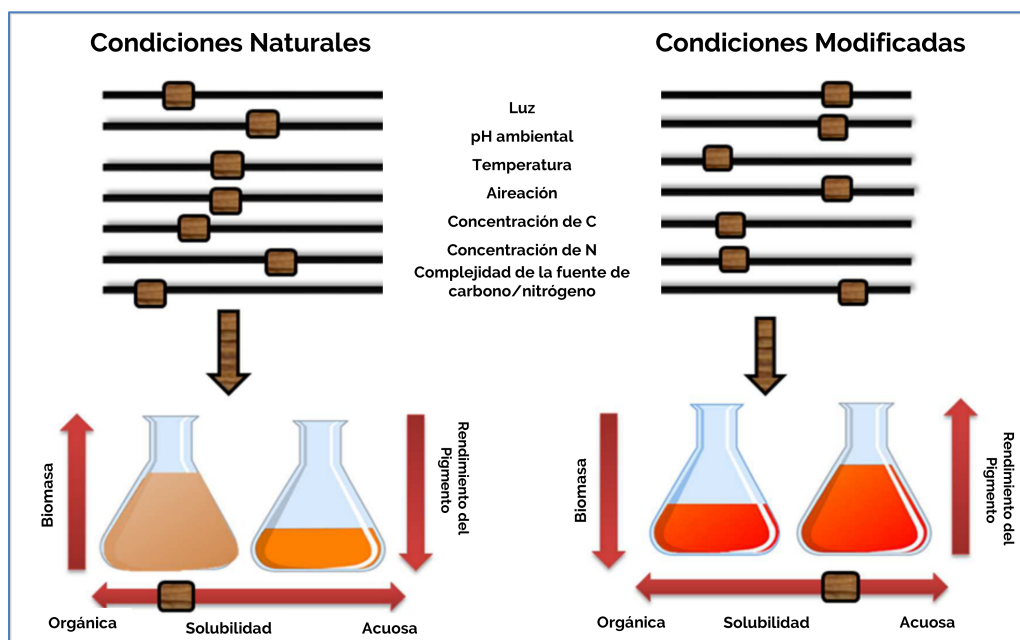


Figura 4. Diversos factores que afectan al crecimiento de la biomasa y al rendimiento de los pigmentos. Esquema recuperado y adaptado al español, de: (Kalra et al., 2020).

Extracción de pigmentos

La selección de técnicas de extracción es un paso importante para la recuperación segura y eficiente de estos metabolitos y depende principalmente de la naturaleza de los metabolitos de interés y localización de estos metabolitos en los cultivos fúngicos.

La **figura 5**, representa los métodos de recuperación, extracción y aislamiento más comunes utilizados después del proceso de producción en medios de fermentación (ya sea sumergida o en estado sólido). Típicamente, el proceso inicia

con la separación de la biomasa del medio de cultivo mediante centrifugación/filtración. De manera general, algunos pigmentos extracelulares solubles en agua y no requieren ningún disolvente orgánico para su extracción, por lo que se consideran seguros y también pueden directamente en diferentes productos alimenticios sin modificación adicional o sin emplear ningún portador/estabilizador. Por el contrario, los compuestos intracelulares o presentes en el medio extracelular pero que son insolubles en agua requieren procesos de extracción convencionales con disolventes orgánicos (Soxhlet, homogeneización, agitación) y posteriores pasos de evaporación y redisolución de pigmentos para llevar a cabo la purificación por cromatografía de columna.

Es importante señalar que el uso de disolventes orgánico además de ser complicados (por su seguridad y su impacto medioambiental) y consumir mucho tiempo, también conllevan la necesidad de controles reglamentarios más costosos y rigurosos.

En las dos últimas décadas se ha impulsado una gran cantidad de investigaciones hacia el desarrollo de métodos de extracción y separación utilizando tecnología más seguras y respetuosas con el ambiente. Por lo que alternativamente para la extracción de compuestos hidrofóbicos e intracelulares, existen los métodos de extracción verdes. Estos métodos son preferibles ya que están libres de disolventes orgánicos o al menos necesitan menos cantidad de disolventes e incluye a la extracción asistida por ultrasonido, extracción por líquido presurizado, extracción asistida por microondas, extracción por líquido iónico y extracción con CO₂ supercrítico. Algunas de estas técnicas de extracción también funcionan a baja temperatura, lo que también favorece a la extracción de pigmentos sin su degradación.

Por ejemplo, la extracción asistida por ultrasonidos se basa principalmente en el empleo de ondas de presión de ultrasonidos de alta intensidad para acelerar la extracción de un material sólido en un disolvente líquido. La extracción asistida por ultrasonidos ha sido reconocida como un método de extracción eficiente y ambientalmente seguro en varias industrias fitofarmacéuticas.

Por otra parte, la extracción con líquidos presurizada, también conocida como extracción de solventes acelerada, ha surgido como una técnica avanzada a los métodos convencionales de extracción con disolventes como el reflujo, la extracción Soxhlet la percolación o la maceración en términos de consumo de disolvente, tiempo de extracción, rendimientos de extracción y reproducibilidad. Se caracteriza por ser una técnica automatizada utilizada para la extracción exhaustiva de matrices sólidas con la ayuda de presión y temperatura elevadas y disminuyendo el consumo de disolventes. Ambos parámetros actúan conjuntamente para la eliminación completa de los metabolitos de la matriz y la alta presión ayuda a la penetración de los disolventes en la muestra, mientras que con la ayuda de una temperatura más alta la solubilidad y la tasa de difusión de los metabolitos rompen las interacciones entre la matriz y los analitos.

La aplicación de una metodología de extracción barata, eficiente y segura, para la recuperación de pigmentos naturales es uno de los principales desafíos a superar para permitir la producción a gran escala.

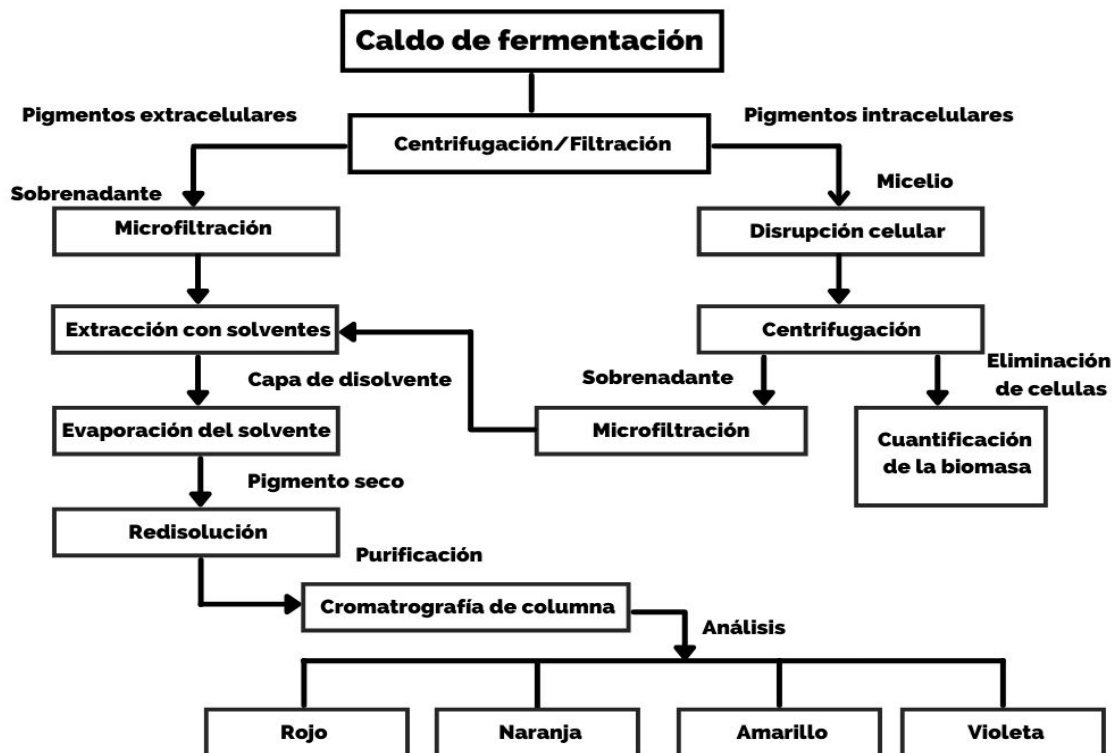


Figura 5. Esquema de la recuperación, extracción y aislamiento de los pigmentos de *Talaromyces/Penicillium* tras el proceso de fermentación. Esquema recuperado y adaptado al español, de: (Morales-Oyervides et al., 2020).

Caracterización de pigmentos

La caracterización de los compuestos resultantes de la biosíntesis de los metabolitos secundarios es indispensable. La elucidación molecular implica establecer la estructura química de una molécula, lo que permite comprender las características moleculares (propiedades como color, sabor, capacidad antioxidante, etc.) y predecir su posible uso y/o toxicidad.

La caracterización de la estructura molecular es un requisito fundamental para cumplir con las regulaciones compuestas de sectores industriales como alimentos, agroquímicos farmacéuticos y otros registros de nuevas entidades químicas.

La elucidación de las propiedades moleculares se puede lograr mediante varios métodos. A continuación, se muestra un esquema de los métodos comúnmente utilizados para el estudio y caracterización de estos compuestos. Entre ellos se encuentran de separación en donde se emplean los métodos cromatográficos como la cromatografía de capa fina y la cromatografía de líquidos de alta resolución, así como los métodos de detección e identificación que incluye a los métodos espectrofotométricos como la espectroscopía infrarroja (IR), ultravioleta visible (UV-Vis) y difusión de RAMAN; los métodos espectrométricos como la espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN), resonancia espín electrónico (RSE) y la espectrometría de masas (MS).

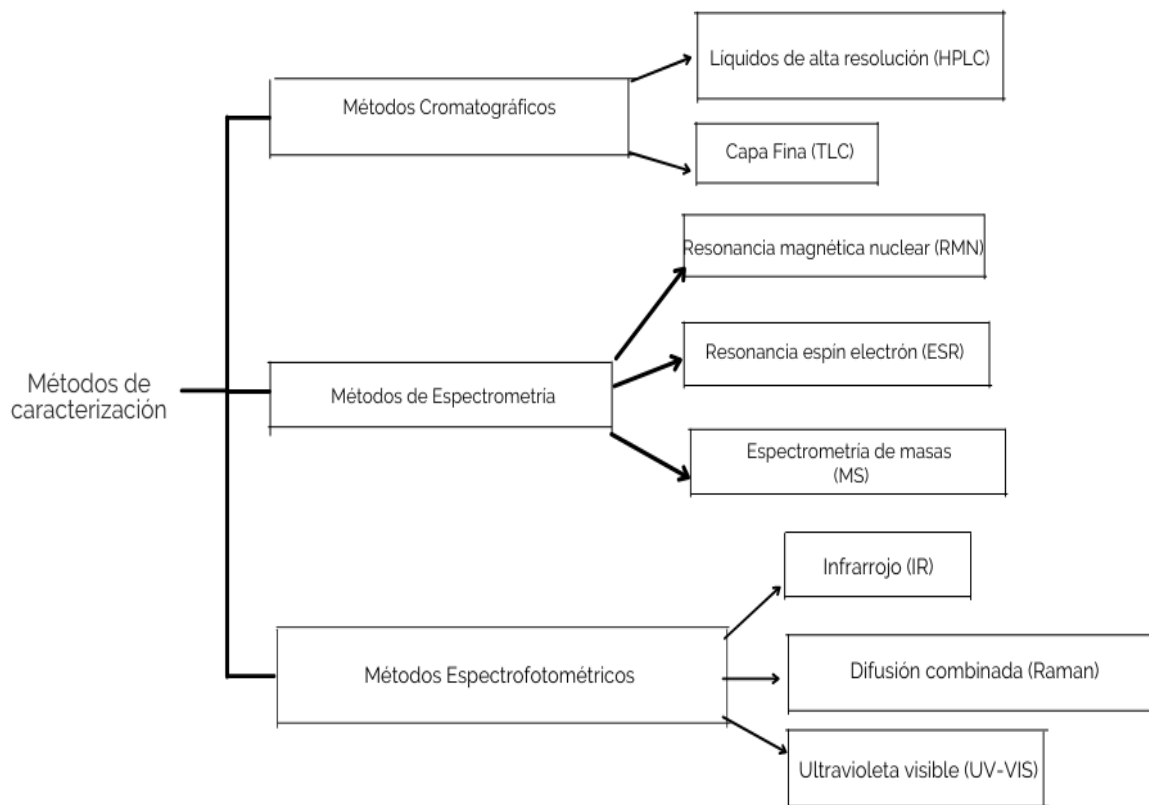


Figura 6. Esquema de métodos de caracterización reportados en la literatura

A manera de ejemplo, en la **figura 7** se presenta un esquema de un protocolo analítico integrado la caracterización de tintes naturales. La extracción con metanol permite obtener diversas tonalidades de acuerdo con el tipo de compuesto extraído: Amarillo, naranja o negro derivados de flavonoides, apocarotenoides, protoberberines, tanino e hidroxicinamatos; marrón, azul o verde producto de flavonoides y protoberberines; púrpura y rojo derivado de orceínas, antraquinonas, flavonoides y taninos. Sin embargo, cuando se utiliza DMSO, las tonalidades marrón, azul, verde y

púrpura produce indigoides. Estas moléculas se identifican de acuerdo con máximo de absorción que presentan en el espectro UV-Vis y análisis de espectrometría de masas/masas.

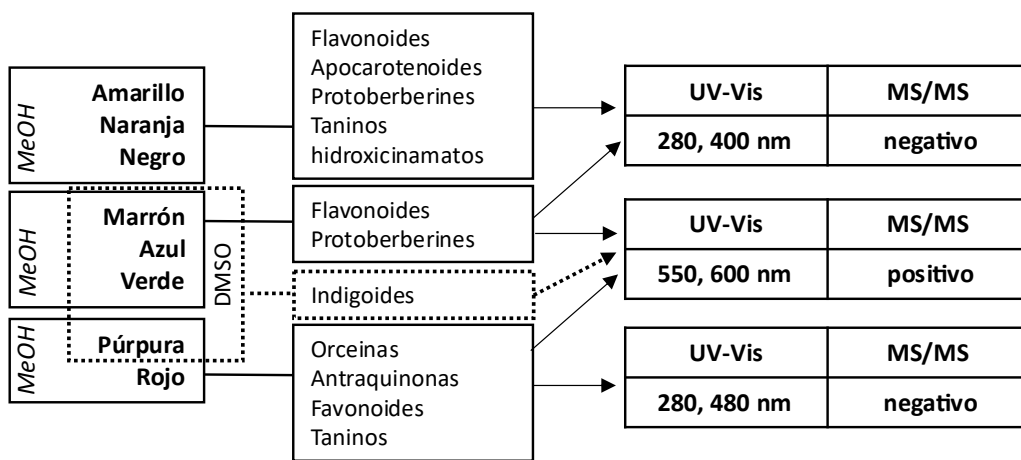


Figura 7. Esquema del protocolo analítico integrado combinando la extracción y el análisis de colorantes por la identificación de tintes naturales usando HPLC-UV-Vis-ESI MS/MS (Lech & Fornal, 2020).

Aplicaciones

Como se mencionó en la introducción, los hongos filamentosos son organismos con una gran diversidad de actividades metabólicas y, debido a ello, son capaces de producir un amplio espectro de sustancias con un valor económico como lo son los metabolitos secundarios y pigmentos.

Uno de los principales motivos por los que ha ido en aumento el interés por estos pigmentos es que plantean una alternativa viable ante el uso de pigmentos sintéticos que afectan de gran manera el medio ambiente.

Dentro de la literatura se han logrado identificar una variedad sustancial de aplicaciones para los pigmentos de origen fúngico, entre los que pueden mencionarse su aplicación como colorantes para alimentos, agentes antimicrobianos, antioxidantes, citotóxicos, productores de pigmentos para la industria cosmética, textil, maderera y electrónica (Lagashetti et al., 2019).

Estas aplicaciones recaen directamente en las estructuras químicas que presentan los compuestos producidos al tener implícitas, en su composición, grupos funcionales como lo son las azaflonas, carotenoides, quinonas, melaninas, flavinas, entre otras que logran pigmentaciones características y que poseen, a su vez, características antimicrobianas (carotenoides, melaninas, etc.), anti oxidativas (carotenoides, naftoquinonas, etc.) (Narsing Rao, Xiao, & Li, 2017).

Perspectivas

La obtención de pigmentos a partir de hongo resulta una alternativa viable para la producción de moléculas pigmentadas. Debido a la gran diversidad de especies biológicas y versatilidad metabólica, se genera una amplia gama de moléculas pigmentadas provenientes de diversas estructuras químicas que dependen tanto del tipo de hongo, condiciones de cultivo y/o extracción.

La presente revisión describe los aspectos generales que se han estudiado relacionados la obtención de pigmentos fúngicos, incluida la clase de pigmentos, las especies productoras de pigmentos, la condición fisicoquímica de la biosíntesis, la extracción, aislamiento y la caracterización, así como sus posibles aplicaciones.

Entre los principales retos que se deben superar para lograr la comercialización de los pigmentos fúngicos está el maximizar el rendimiento de obtención del pigmento a través de la optimización de las condiciones de cultivo o herramientas biotecnológicas y de ingeniería genética, así como fuentes económicas de carbono y/o industriales. Además de mejorar los procesos de extracción, aislamiento y purificación con técnicas más amigables al medio ambiente.

Adicionalmente, se debe considerar que la mayoría de los hongos tiende a producir más allá de un solo tipo de pigmento, por lo que, otro reto importante para la industria es el poder dirigir en el futuro la producción de los

pigmentos hacia un solo colorante en específico y libre de micotoxinas. Por ello, es indispensable llevar a cabo la caracterización molecular tanto del pigmento como de los productos generados.

En ese mismo sentido, los pigmentos fúngicos empleados como colorantes alimentarios deber superar el reto de ser aprobados por una agencia reguladora para garantizar su seguridad e inocuidad alimentaria, puesto que en la actualidad existen muchas limitaciones y legislaciones que cubren este tema, sin embargo, las condiciones y formas de aprobación dependerán de la región de producción y el país que busque introducir en su mercado estos pigmentos.

Conclusiones

En los últimos años la industria de los pigmentos ha centrado sus investigaciones en la búsqueda de fuentes sostenibles y potenciales en la producción de pigmentos a partir de fuentes naturales, que no representen ningún riesgo para la salud humana y el medio ambiente. Con ello, se ha reavivado el interés hacia el estudio de colorantes naturales, tales como los producidos a partir de ciertas especies de hongos filamentosos. Esto también ha derivado de la creciente inclinación moderna en la sociedad hacia la preferencia de productos “naturales”, así como de la preocupación del consumidor por el impacto de los colorantes sintéticos en la salud y el medio ambiente.

Es así como, con esta revisión se presentó el potencial de los pigmentos obtenidos a partir de fuentes naturales. Destacando su valor como compuestos bioactivos con una creciente demanda en el mercado, y contribuyendo a su vez en la sustitución de los pigmentos sintetizados químicamente. Sin embargo, los métodos de producción de pigmentos a partir de especies fúngicas deben ser mejorado desde la resolución de las estrategias de fermentación, el control sobre las condiciones de cultivo y la reducción de los costos de producción para poder competir con los pigmentos presentes en el mercado y hacer de ellos una verdadera alternativa viable para su uso y consumo.

Finalmente, nos permitió establecer las bases para una futura investigación desde el ámbito experimental, que dadas las condiciones sanitarias ante las que nos enfrentamos hoy día, no han sido posibles de desarrollar, pero que claramente nos hacen una invitación a seguir trabajando arduamente en la consecución de nuestros objetivos.

Bibliografía

- Gmoser, R., Ferreira, J. A., Lennartsson, P. R., & Taherzadeh, M. J. (2017). Filamentous ascomycetes fungi as a source of natural pigments. *Fungal Biology and Biotechnology*. BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s40694-017-0033-2>
- Kalra, R., Conlan, X. A., & Goel, M. (2020, May 8). Fungi as a Potential Source of Pigments: Harnessing Filamentous Fungi. *Frontiers in Chemistry*. Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00369>
- Kishor, R., Purchase, D., Saratale, G. D., Saratale, R. G., Ferreira, L. F. R., Bilal, M., ... Bharagava, R. N. (2021). Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105012. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>
- Lagashetti, A. C., Dufossé, L., Singh, S. K., & Singh, P. N. (2019). Fungal pigments and their prospects in different industries. *Microorganisms*, 7(12), 1-36. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7120604>
- Valenzuela-Gloria, M. S., Balagurusamy, N., Chávez-González, M. L., Aguilar, O., Hernández-Almanza, A., & Aguilar, C. N. (2021, April 23). Molecular characterization of fungal pigments. *Journal of Fungi*. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jof7050326>
- Narsing Rao, M. P., Xiao, M., & Li, W.-J. (2017). Fungal and Bacterial Pigments: Secondary Metabolites with Wide Applications. *Frontiers in Microbiology*, 8. doi:10.3389/fmicb.2017.01113