

¡HÁGASE LA LUZ!: HONGOS BIOLUMINISCENTES Y SUS APLICACIONES
BIOTECNOLÓGICAS
LET THERE BE LIGHT: BIOLUMINESCENT FUNGI AND THEIR
BIOTECHNOLOGICAL APPLICATIONS

Jenny Espinosa-Acosta, Leslie Asenat Laguna-Morales

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias Biológicas
Licenciatura en Biotecnología

jenny.espinosaacosta@viep.com.mx, leslie.lagunamorales@viep.com.mx

Palabras clave: Hongos, bioluminiscencia, luciferasa, origen, ubicación, ecología, aplicaciones.

Keywords: Fungi, bioluminescence, luciferase, origin, location, ecology, applications.

Resumen

La bioluminiscencia es una de las más grandes maravillas de la naturaleza. Asimismo, los hongos son seres vivos magníficos que presentan estructuras con formas muy caprichosas y hermosas. De esta forma, los hongos bioluminiscentes son toda una obra de arte. No obstante, la ciencia se ha interesado en ellos no solo por su estética, sino por sus posibles aplicaciones. Desde usar algunos de sus elementos para rastrear algunas células hasta lograr crear plantas que emiten luz, los hongos bioluminiscentes han sido usados por la Biotecnología logrando cosas dignas de una película de ciencia ficción. El propósito de este artículo de divulgación científica es abordar temas como qué es la bioluminiscencia, qué son los hongos bioluminiscentes, su origen, dónde se encuentran, cómo producen su bioluminiscencia, para qué les sirve, su papel ecológico y algunas aplicaciones que han tenido en la biotecnología.

Abstract

Bioluminescence is one of the greatest wonders of nature. Likewise, mushrooms are magnificent living beings that present structures with very whimsical and beautiful shapes. Thus, bioluminescent mushrooms are a work of art. However, science has become interested in them not only for their aesthetics, but also for their possible applications. From using some of their elements to track some cells to creating plants that emit light, bioluminescent fungi have been used by biotechnology to achieve things worthy of a science fiction movie. The purpose of this popular science article is to address topics such as what is bioluminescence, what are bioluminescent fungi, their origin, where are they found, how their bioluminescence is produced, what is their use, their ecological role and some of the applications they have had in biotechnology.

Introducción

Es bien sabido que nuestros ancestros trataban de explicar los fenómenos naturales. Creían en la magia, creaban mitos y adoraban a la naturaleza basando a sus deidades en ella. Nuestros antepasados creían en que algunos árboles tenían poderes mágicos y no es difícil imaginar su sorpresa al observar troncos de árboles caídos que emitían luz. Así se originaron leyendas, mitos, poemas y este fenómeno natural nos sigue deleitando hasta nuestros días. Todos hemos leído algún cuento que habla sobre bosques encantados que poseen maravillas y secretos magníficos, incluso el cine nos ha mostrado paisajes increíbles donde la noche no es oscura y rondan seres preciosos alumbrando el camino. Lo que nuestros ancestros miraban eran hongos bioluminiscentes (Figura 1).

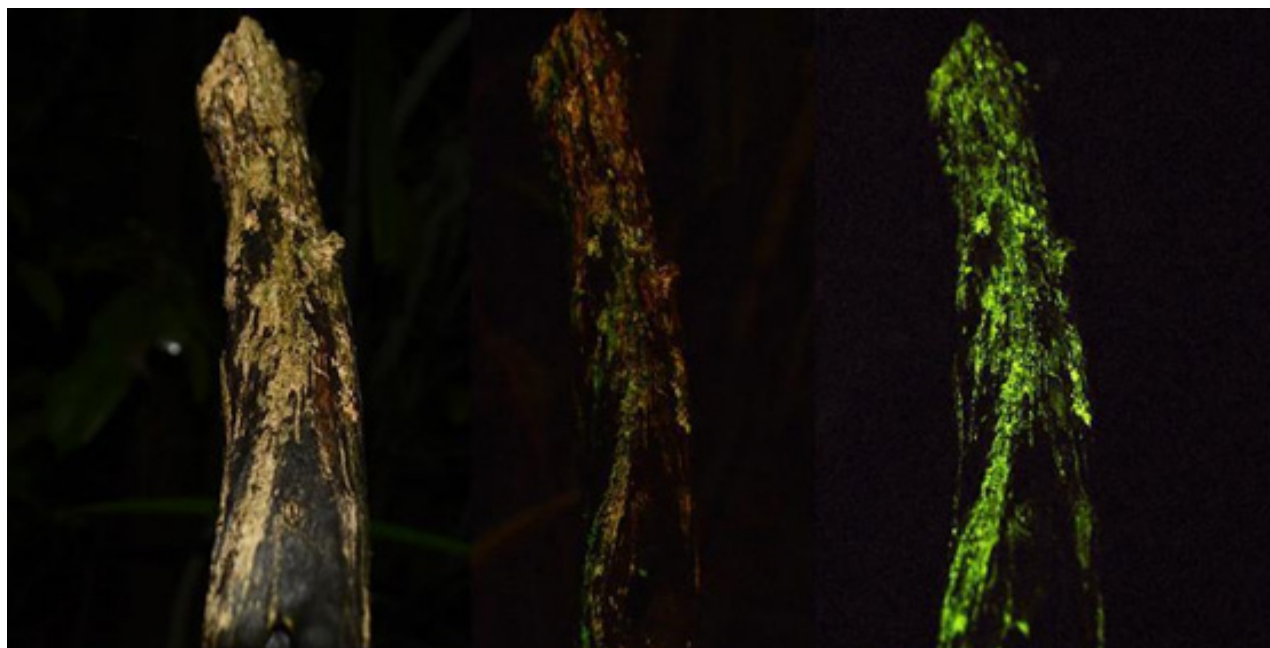


Figura 1. Troncos con hongos bioluminiscentes. Nota: Extraído de Bio-luminescent fungi[Fotografía], por siddarth.machado, 2016, Flickr (<https://flic.kr/p/MfHjRK>). CC BY-NC 2.0

La bioluminiscencia es uno de los fenómenos más fascinantes y hermosos en la naturaleza. El término se refiere a la luz producida por los organismos, que es consecuencia de una reacción química natural. Así, la luz puede ser emitida por distintos organismos tales como bacterias, plancton, insectos (sí, como las luciérnagas), animales y hongos. Entonces, es posible definir a los hongos bioluminiscentes como aquellos hongos que emiten luz.

La bioluminiscencia no es un fenómeno extremadamente extraño. De hecho, un gran número de animales y microorganismos que viven en el mar presentan la capacidad de producir su propia luz (Figura 2), y en la mayor parte del volumen del océano, la bioluminiscencia es la principal fuente de luz.



Figura 2. Microorganismos bioluminiscentes dando todo un espectáculo visual en la playa. Nota: Adaptado de Some more photos of the bioluminescent tide at Dog Beach (Del Mar North Beach) in Del Mar. [Fotografía], por slworking2, 2020, Flickr (<https://flic.kr/p/2j1aHQp>). CC BY-NC-SA 2.0

Quizá no estemos tan familiarizados con este fenómeno ya que la bioluminiscencia se encuentra prácticamente ausente en el agua dulce, solo algunas larvas de insectos y una lapa de agua dulce muestran esta característica. Por otro lado, en la tierra, el ejemplo más común de un organismo bioluminiscente es la luciérnaga, pero también hay escarabajos, algunas moscas, ciempiés, milpiés, caracoles, lombrices de tierra y por supuesto hongos (Haddock et al., 2010). Cabe mencionar que no existen plantas bioluminiscentes (Wilson y Woodland, 2013), al menos por naturaleza.

En este artículo se pretende dar a conocer qué es la bioluminiscencia, qué son los hongos bioluminiscentes, su origen, dónde se encuentran, cómo se produce su bioluminiscencia, para qué les sirve, su papel ecológico y algunas de las aplicaciones que ha tenido en la biotecnología.

¿Qué es la bioluminiscencia?

Para entender este término que ha causado el asombro y expectativas de un nuevo mundo en la Tierra, primero debemos entender qué es la “luminiscencia”. Este término fue acuñado en 1888 por Eilhardt Wiedemann y significa “emisión de la luz fría”. Sin embargo, fue gracias a Harvey en 1916 que el término fue utilizado para referirse a la luz emitida por organismos vivos (Osamu, 2006). Siendo así definida como el fenómeno de la generación bioquímica de luz por parte de un organismo vivo (Sato et al., 2004).

La bioluminiscencia en los hongos macroscópicos o setas es conocida desde la época de la antigua Grecia, mencionando que Aristóteles describió a este fenómeno como “Madera brillante” y “Fuego del zorro”, que más adelante Plinio señaló como hongos blancos que brillaban (Bondar et al., 2012).

En Micronesia también se habló del uso de hongos bioluminiscentes en danzas rituales para intimidar a sus enemigos. No fue hasta el siglo XIX cuando todos los datos y descubrimientos anteriores de la madera y hongos brillantes fue estudiada a fondo, concluyendo que ésto es debido a un proceso biológico (Bondar et al., 2012).

La luminiscencia puede presentarse en los micelios de algunas especies, es decir, en aquellos conjuntos filamentosos que crecen debajo de la tierra o maderas y emiten cierta luz, como en el género *Mycena*. También se ha descrito esta luz en los cuerpos fructíferos, o en ambos (Hedda et al., 2001). Ahora es bien

conocido que sus cuerpos fructíferos (en la mayoría de las especies, ver Figura 3) son los responsables de la emisión de luz de forma constante. Cabe mencionar que la luminiscencia de estos organismos suele ser más discreta que la de otros seres como las luciérnagas, cuya luz es fácil de observar y disfrutar. Aun así, la cantidad de luz emitida por el micelio y el cuerpo fructífero es significativa dado que es un proceso continuo a lo largo de la vida del hongo (Teranishi, 2016).

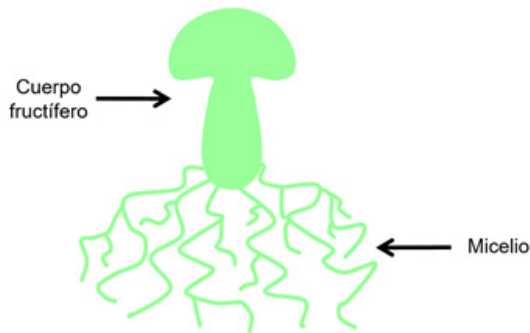


Figura 3. Partes de un hongo. Elaboración propia.

Fue así que en 1959 Airth y McElroy, estudiaron este fenómeno en extractos libres de células fúngicas (células de hongos), al añadir una coenzima (elemento implicado en la aceleración de reacciones) conocida como NADPH (Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato) a mezclas de las especies de hongos *Collybia velutipes* (Seta de pie aterciopelado) y *Armillaria mellea* (Seta miel) (Purtov et al., 2015). La naturaleza química de este proceso ha sido descrita en su mayoría en la literatura en torno a la oxidación de la luciferina (sustrato) y la enzima responsable de la reacción, la luciferasa (Mihail et al., 2018).

¿Quieres encontrar a estos hongos?

Una peculiaridad interesante es el hecho de que la mayor cantidad de los sistemas bioluminiscentes se encuentran en el mar, a diferencia de los que encontramos en medios terrestres cuya cantidad es menor pero igual de interesante. Entre las especies terrestres bioluminiscentes se destacan a los hongos (Osamu, 2006). Podemos encontrar especies en Asia, en específico en el sudoeste de China (Dauner et al., 2021), también están presentes en zonas de Europa, Australia, Norteamérica en estados como California, en Brasil en el bosque Caaringa (Mahish, 2021) y en países como Vietnam (Dao, 2006). En general podemos encontrarlos en bosques templados, tropicales,

subtropicales, en selvas secas, húmedas y bosques densos, como en Ecuador, Brasil y otros países de Sudamérica. Estos hongos suelen crecer en sustratos húmedos, como madera (Figura 4) u hojas (Figura 5) en estado de descomposición (Chew et al., 2015). Esto es debido a que la humedad y su capacidad de germinación es alta, además el poco viento les ofrece transporte mediante insectos para dispersar sus esporas (Bechara, 2015).



Figura 4. Hongos bioluminiscentes sobre corteza de árbol. Nota: Extraído de Bioluminescent mushrooms (*Filoboletus manipularis*) - DSC_1885s [Fotografía], por Nicky Bay, 2021, Flickr (<https://www.flickr.com/photos/nickadel/51161862179/in/album-72157719118537027/>).



Figura 5. Hongos bioluminiscentes creciendo en sustrato húmedo. Nota: Extraído de *Mycena chlorophos*[Fotografía], por VanessaRyan, 2015, Flickr (<https://flic.kr/p/qPBjKM>). CC BY-NC-SA 2.0

Al parecer hay hongos bioluminiscentes que no quieren ser descubiertos

A pesar de las muchas especies existentes de hongos bioluminiscentes (algunas mencionadas en los apartados anteriores), en realidad no son tan fáciles de encontrar. Investigadores como Bechara (2015) menciona que encontrarlos requiere un largo tiempo de observación, ya que algunos poseen tamaños muy pequeños o están debajo de maderas y hojas (Figura 5). Esta es una de las razones por las que la cantidad de especies de hongos bioluminiscentes descritos aún están por debajo de los 100 (Bechara, 2015).

Según Hedda y colaboradores, se cree que hay 42 especies de hongos, de los cuales, nueve géneros son luminiscentes naturalmente (Hedda et al., 2001). Otros estudios en 2012 mencionaron que había 71 especies, para 2014 se registraron 77 en total. Sin embargo, esta cifra ha ido en aumento gracias a los constantes descubrimientos, teniendo para 2015 un total de 80 especies de hongos (Chew et al., 2015) descritos en cuatro linajes del filo Basidiomycota de esporas blancas, notando que 3 de estos (*Omphalotus*, *Mycenoid* y *Lucentipes*) (Mahish, 2021), posee especies como setas y micelios, mientras en el cuarto del linaje *Armillaria*, hay solo una bioluminiscencia provocada en micelios, efecto que es denominado “Foxfire” (Mihail et al., 2018).

Algunos ejemplos de estas especies son *Panellus* (*Panus*) *stipticus*, *Armillaria mellea*, *Omphalotus olearius* (también conocido como *Pleurotus olearius*, *Clitocybe illudens*) y *Mycena citricolor* (conocido también como *Omphalia flavida*) (Hedda et al., 2001).

El origen de la bioluminiscencia en hongos se debe a ciertos genes.

Explicar exactamente cómo se originaron los hongos bioluminiscentes a nivel de divulgación científica sería digno un capítulo de un libro porque se necesitaría abordar varios conceptos como conocimiento previo antes de entrar al tema. Así pues, en este trabajo solo se dará una explicación muy general.

Para hablar del origen de los hongos bioluminiscentes se debe abordar el origen de su bioluminiscencia. El cómo se produce la bioluminiscencia en los hongos se explica en un apartado posterior, por ahora basta con saber que se necesitan enzimas como hispidin-3-hidroxilasa (H3H), luciferasa e hispidina sintasa. Estas enzimas son proteínas, y si un organismo puede producir una proteína específica significa que ese organismo posee un determinado gen que dicta cómo es que se va a “armar” dicha proteína. De esta forma, se ha descubierto que los genes responsables de las tres enzimas mencionadas se encuentran agrupados y que el grupo se ha conservado a través de hongos bioluminiscentes de tres linajes: *Armillaria*, *mycenoid* y *Omphalotus*. Se ha sugerido que la luciferasa se originó en los primeros Agaricales y que el grupo de genes se originó hace aproximadamente 160 millones de años durante el Jurásico tardío. Como es de esperarse, el grupo de genes de luciferasa ha ido evolucionando a lo largo del tiempo, pero el conocer su historia evolutiva aún presenta grandes retos.

Cabe mencionar que se han identificado distintos genes relacionados con la bioluminiscencia de los hongos y se ha propuesto estudiarlos a mayor profundidad. Por otro lado, se sabe que la bioluminiscencia se ha perdido en distintas especies de hongos y se sigue estudiando el papel ecológico de las especies que lo conservan. Lo anterior ayudaría a descubrir si la bioluminiscencia se derivó de un proceso biológico que actualmente se desconoce, el cual posiblemente estaría relacionado con alguna función ecológica (Ke et al., 2020).

La bioluminiscencia: resultado de un mecanismo bioquímico

En contraste con las bacterias bioluminiscentes, se conoce poco sobre la bioquímica de la bioluminiscencia fúngica (Hedda et al., 2001). Para comenzar, se ha determinado que su luz posee una coloración verde amarillenta (Figura 6), cuya intensidad máxima (la longitud de su onda de luz) se encuentra en el rango de 520 a 530 nm (nanómetros), variando entre cada especie (Chew et al., 2015). Sin embargo, las diferencias de la localización morfológica, enzimas y compuestos del mecanismo, descritos para cada filo, ha causado la suposición de que este fenómeno podría ser diferente para cada género, es decir, que implica orígenes diferentes para la bioluminiscencia (Oliveira et al., 2012). No obstante, gracias a las pruebas realizadas en extractos fríos y calientes de células de hongos se concluyó



Figura 6. Hongos bioluminiscentes tonalidad. Nota: Extraído de “Lights on, lights off” [Fotografía], por Smoken Mirror, 2010. Flickr (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>) CC BY-NC 2.0.

Los autores Airth y Foerster han descrito un mecanismo en dos partes (Figura 7) apoyado por varios científicos de la comunidad. En el primer paso, una enzima (un elemento que disminuye velocidad de las reacciones) ayuda a una sustancia llamada “Precursor de Luciferina” a ganar energía mediante electrones, es decir, hay una reacción de reducción. El resultado de esta primera reacción es una nueva molécula denominada Luciferina fúngica completa (Purtov et al., 2015).

En el segundo paso, esta última molécula obtenida pierde electrones y se los da al oxígeno en el aire, en una reacción conocida como oxidación, mediante otra enzima denominada Luciferasa. Es decir, podemos comparar que nuestra masa ya leudada obtenida de la primera reacción no puede volverse un pequeño cuernito por si sola, así que para meterla al horno y obtener un pan cocido, debemos quitarle volumen (quitar electrones) así que nosotros (enzima luceferasa) le quitamos la masa extra y la ponemos en otro traste (el oxígeno del aire). El resultado de esta segunda reacción es la luz del hongo (Purtov et al., 2015).

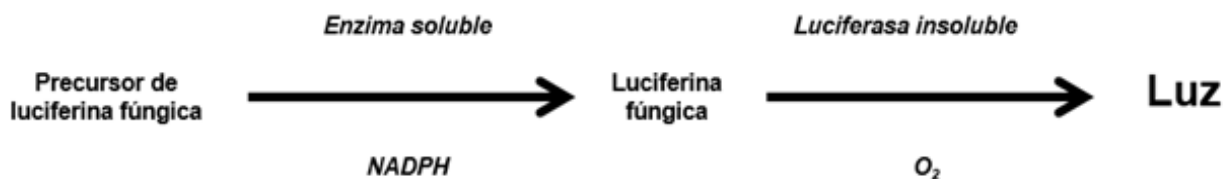


Figura 7. Mecanismo de bioluminiscencia fúngica (del hongo) de Purtov y colaboradores, basado en el propuesto por Airth y Foerster. Elaboración propia.

Purtov et al. (2015), apoyaron esta teoría al identificar las sustancias que participan en la reacción. Descubrieron que la 3- Hidroxihispidina es también conocida como la luciferina fúngica ya que este compuesto químico del metabolismo secundario puede obtenerse de la hispidina (el precursor de Luciferina, ver Figura 8) siendo transformada en la primera parte del mecanismo por la enzima 3-Hidroxihispidina. Los autores también identificaron que este precursor está presente en especies como *Neonothopanus gardneri*, *Mycena chlorophos* y *Omphalotus japonicus*.

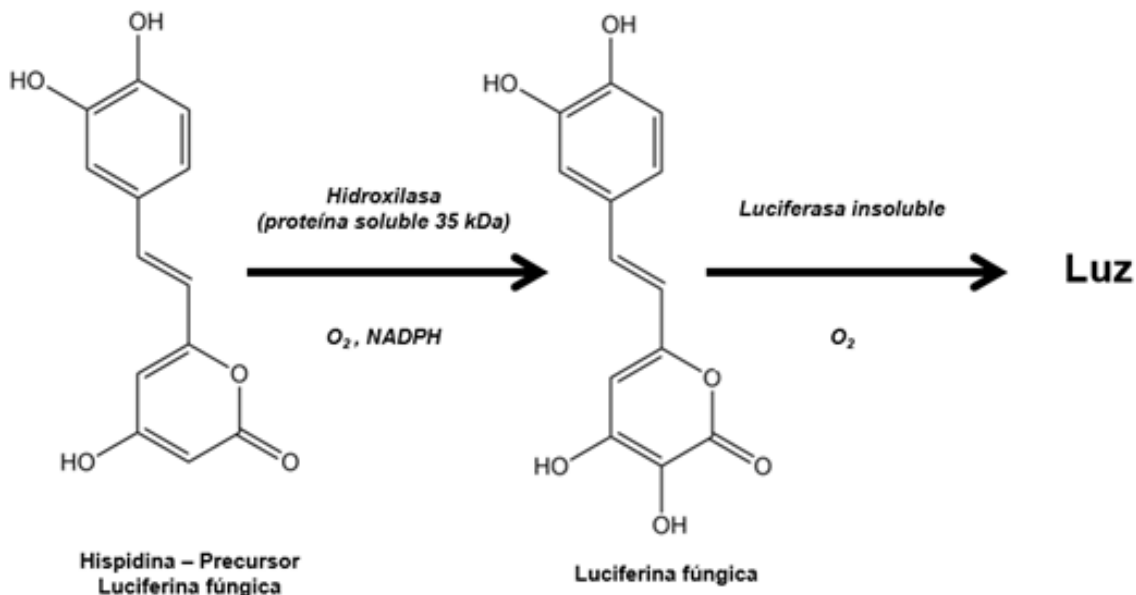


Figura 8. Mecanismo de dos fases con Hispidina, descrito por Purtov y colaboradores. Elaboración propia.

A pesar de que la luciferina fúngica tiene un papel importante en el mecanismo de dos fases, aún se desconoce si participa en otros procesos. La caracterización de la luciferina fúngica es difícil, debido a la baja posibilidad de obtener la sustancia en su forma pura, ya que presenta una estabilidad media y se encuentra en baja cantidad (Purtov et al., 2015). Es importante mencionar que algunos géneros de hongos (como *Armillaria* y *Desarmillaria*) pierden su bioluminiscencia a medida que van madurando. Se infiere que esto se debe a la cantidad disponible de luciferina (Mihail et al., 2018). Por las razones presentadas, el mecanismo no es descartado, pero aún es considerado como una teoría (Purtov et al., 2015).

Se piensa que brillan principalmente para coquetear con los insectos

Los hongos bioluminiscentes de las selvas Amazónicas han demostrado emitir luz como un método para atraer insectos y utilizarlos para la dispersión de sus esporas, con el fin de potenciar su distribución. Esto es considerado como el propósito o motivo principal para irradiar luz, pero no es el único.

Entre los insectos que son “flechados” por la luz del hongo bioluminiscente tenemos que los himenópteros (las hormigas y avispas), los escarabajos estafilínidos (coleópteros), los hemípteros y dípteros (moscas) son los más atraídos por esta luminiscencia (Oliveira et al., 2015). También las chinches y escarabajos rojos son hipnotizados por la luz y atraídos hacia sus superficies, sin embargo, esta atracción de artrópodos aún deja dudas sobre otros posibles papeles en el nicho (Waldenmaier et al., 2015).

Por otra parte, la importancia de la bioluminiscencia en los hongos se ha atribuido al aposematismo (el desagradado hacia el depredador) para su protección (Bechara, 2015). Asimismo, se ha propuesto que la emisión de la luz verde (λ_{max} 530 nm) es parte del metabolismo del hongo. Es decir, se piensa que al momento de degradar su alimento (como la lignina), podrían liberarse subproductos o producirse reacciones que generan la luminiscencia (Oliveira et al., 2015).

Por otro lado, Waldenmaier y colaboradores mencionan que la bioluminiscencia posee una función relacionada con la eliminación de especies reactivas de oxígeno (ROS) en el hongo, que son radicales libres que generan daños en las células. Las ROS se producen naturalmente en la respiración celular y en la degradación de lignina en los hongos, es decir, se generan por su respiración y mientras degradan su comida, por lo que suelen ser eliminadas al finalizar dichos procesos para que no causen problemas (Waldenmaier et al., 2015). Finalmente, Bondar y colaboradores (2012) indican que, en el caso de los organismos que emiten luz, las enzimas solubles (como hidroxilasas) y los compuestos como la ergosterina pueden intensificar su luz. Asimismo, los autores mencionan que dichos elementos también fortalecen las membranas celulares. Por lo tanto, se propone que la bioluminiscencia de los hongos está relacionada con su protección. Sin embargo, el estudio continúa, ya que se busca cómo se relaciona este suceso con la luciferasa.

Bio...¿qué? ¿Qué es la biotecnología?

Dar una definición satisfactoria sobre qué es la biotecnología es algo complicado, incluso para los Biotecnólogos, ya que es un campo multidisciplinario que tiene un gran impacto en nuestras vidas. Algunos científicos definen a la biotecnología como “la aplicación de los principios de la ingeniería y las ciencias biológicas para crear nuevos productos a partir de materias primas de origen biológico”. Por lo tanto, es posible afirmar que la biotecnología emplea material vivo o sus derivados para crear nuevos productos y aplicaciones en distintas áreas, como la farmacéutica, agrícola, médica, ambiental, entre otras, con la finalidad de beneficiar a los seres humanos (Verma et al., 2011).

La biotecnología nació hace mucho tiempo, cuando las plantas y animales comenzaron a criarse selectivamente y se hizo uso de microorganismos para producir cerveza, pan, vino y queso. Así, la biotecnología convencional se refiere al uso de organismos vivos para fines específicos, por ejemplo, la elaboración de pan o queso (Gupta et al., 2016). Sin embargo, la biotecnología se encuentra evolucionando a grandes pasos gracias a las nuevas tecnologías y una mejor comprensión de las ciencias biológicas. La biotecnología moderna surgió después de la Segunda Guerra Mundial, llegó con descubrimientos como la estructura del ADN (Figura 9), los procesos por los que pasa en la célula, cómo “multiplicarlo” en el laboratorio y cómo insertar ADN de un organismo a otro, así como poder estudiar si la descendencia del segundo organismo ha heredado la modificación (Verma et al., 2011).

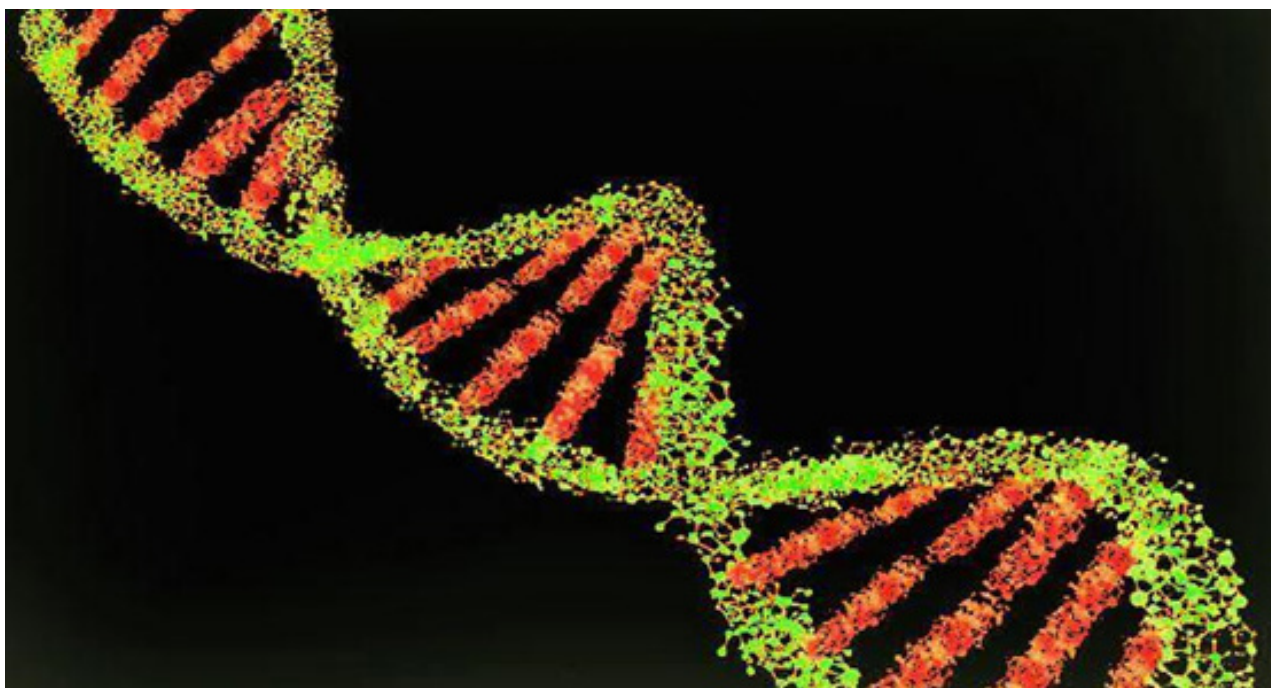


Figura 9. Cadena de ADN. Nota: Extraído de non-covalent hydrogen bonds betwixt base pairs of the DNA-Double-Helix visualized through an electron microscope [Fotografía], por quapan, 2017, Flickr (<https://flic.kr/p/SEG81X>). CC BY 2.0

Aplicaciones biotecnológicas de los hongos bioluminiscentes

La biotecnología puede encontrarse fuera del laboratorio

No todo se trata de experimentos complejos o elegantemente simples, la biotecnología ha existido desde antes de que los humanos estuvieran conscientes de que algunos de ellos eran biotecnólogos. Se sabe que la bioluminiscencia ha sido observada y documentada desde la antigüedad. En el libro *Historia Naturalis* se menciona que, en Francia, específicamente en árboles en descomposición (Figura 10), era posible hallar a unos hongos blancos bioluminiscentes, con sabor dulce y con propiedades farmacológicas. Algo más sorprendente es que el médico Holandés G.E. Rumph (1637-1706) documentó que nativos de Indonesia iluminaban su camino en la selva oscura llevando cuerpos fructíferos de hongos bioluminiscentes en sus manos. Asimismo, 200 años después, se descubrió que en Micronesia los nativos empleaban a los hongos bioluminiscentes como adornos en danzas y algunos rituales, o los aplastaban sobre sus rostros para asustar a sus enemigos (Fraga, 2008). Otro dato interesante es que existe una carta de la Segunda Guerra Mundial, donde un reportero ame-

ricano que se encontraba en Nueva Guinea le decía a su esposa “te estoy escribiendo esta carta a la luz de unos hongos” (Arrondo-Odriozola, 1985).

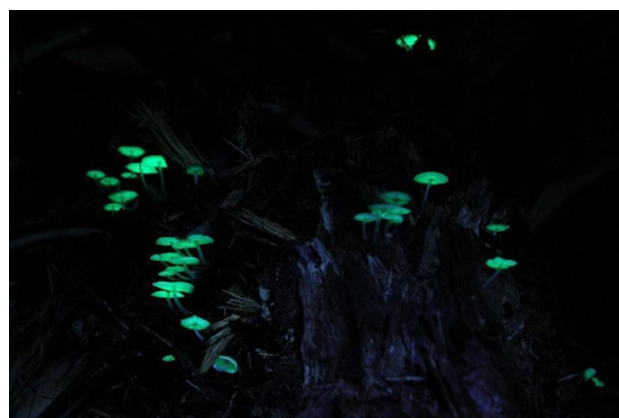


Figura 10. Tronco con hongos bioluminiscentes. Nota: Extraído de Avatar Shmavatar [Fotografía], por Smoken Mirror, 2010, Flickr (<https://flic.kr/p/7HXPh8>). CC BY-NC 2.0

La bioluminiscencia tiene aplicaciones en la medicina

La luminiscencia es un proceso biológico útil para el sector de la salud por sus múltiples aplicaciones. Por ejemplo, en el diagnóstico clínico puede actuar como biosensor. Los biosensores son dispositivos analíticos que están conformados por una sustancia biológica y mecanismos que registran los datos e interacciones mediante señales (Jiménez, 2009); de esta forma, es posible emplear sustancias fluorescentes para detectar tejidos, secciones del cuerpo o células. Estos estudios han tenido gran impacto en áreas como el cáncer. Otra aplicación para la identificación es mediante la unión de las sustancias fluorescentes (como las luciferinas) con anticuerpos (sustancias del sistema inmune que combaten a los patógenos), en pruebas conocidas como inmunoensayos. De forma más específica y gracias a las uniones antes mencionadas, han ayudado al descubrimiento de compuestos de interés para medicamentos (Mahish, 2021).

Otra importante participación de estos hongos es en diversos estudios de virulencia y crecimiento de otros hongos en tiempo real (especies como *Candida albicans*, *Cryptococcus neoformans* y *Aspergillus fumigatus*) mediante el uso de sus Luciferasas para generar luz en imágenes BLI precisas (imágenes adquiridas por la absorción de luz en hemoglobina) permitiendo el estudio de enfermedades de progresión temporal y espacial para seres vivos, es decir, puede iluminar el crecimiento de células, tejidos o secciones (Mahish, 2021).

Limpiando el ambiente con hongos bioluminiscentes

Los genes de los sistemas bioluminiscentes son fácilmente medibles o detectados, por lo que son utilizados como genes reporteros en estudios medioambientales. En específico hablamos de los genes de la luciferasa, que de forma no invasiva permite medir el crecimiento, ubicación y proliferación en laboratorio (Wilson et al., 2008). Cabe mencionar que para poder utilizarlo debe haber una buena relación entre la capacidad luminiscente de la especie de hongo elegida y el crecimiento de éste. Normalmente se ha estudiado para *P. stipticus* (Hedda et al., 2001). Otra aplicación muy conocida, es su papel como biosensores, pero a diferencia de los que se usan en el cuerpo humano, estos participan el control del mercurio, cobre y zinc en el ambiente (Mahish, 2021).

Los hongos bioluminiscentes también han despertado el interés de las empresas

La tecnologías y aplicaciones de la luminiscencia de los hongos van en aumento, de las 80 especies conocidas y estudiadas en el mundo, se han obtenido múltiples beneficios (como los mencionados en apartados anteriores) por lo que actualmente hay empresas biotecnológicas y laboratorios de academias, como en Nueva Zelanda, donde desean estudiar más a fondo esta luminiscencia, logrando así pruebas en grandes cantidades de compuestos químicos para verificar su función biológica, al aislarlas y probarlas en un método denominado cribado de fármacos. También han logrado realizar experimentos para dirigir moléculas mediante la información del gen en ensayos de expresión génica, además de las ya mencionadas, bio-imágenes de organismos como las BLI; todo esto con el propósito de mejorar los actuales estudios de enfermedades y su desarrollo mediante el monitoreo y posibles tratamientos (Dybas, 2019). Recordando que este laboratorio, solo es uno de los muchos que hay en universidades y empresas que realizan pruebas con hongos bioluminiscentes.

A la luz de... ¿Plantas bioluminiscentes?

Si sueñas con tener un jardín con plantas bioluminiscentes que le haga competencia al bosque de la película de Avatar o que algún día puedas salir a pasear a la luz de las plantas como alumbrado público, el hongo bioluminiscente *Neonothopanus nambi* podría concederte tu deseo.

En el artículo "Plants with genetically encoded auto-luminescence" (Mitiouchkina et al., 2020), se trabajó con el hongo bioluminiscente *Neonothopanus nambi* para lograr que las plantas de tabaco *Nicotiana tabacum* y *Nicotiana benthamiana* también fueran capaces de emitir luz.

Vale la pena profundizar un poco más en este artículo, ya que para muchos es emocionante escuchar términos como "modificación genética" e "ingeniería genética", y se desea que el lector tenga una probadita de esto.

En los organismos existen distintas secuencias de reacciones químicas por las que atraviesa un compuesto, denominadas "rutas metabólicas" y algunas de ellas forman ciclos. Las reacciones de estas rutas necesitan llevarse a cabo en poco tiempo (mucho menos de un segundo) para que la vida sea sostenible. Hay reacciones que podrían tardar hasta miles de años en ocurrir. Sin embargo, existen unas proteínas muy especiales denominadas enzimas. Las enzimas son catalizadores biológicos, esto significa que incre-

mentan la velocidad de las reacciones en los organismos de manera impresionante. Por supuesto hay distintas enzimas, por ejemplo, las que se mencionan en este artículo (como la luciferasa).

El ciclo del ácido cafeico es una ruta metabólica responsable de la bioluminiscencia en los hongos. Los científicos determinaron que este ciclo puede ser compatible en las plantas y ser “incluido” en ellas. Pero... ¿Cómo se logra esto? Todo está en ciertos genes.

Como ya se ha mencionado anteriormente, si un organismo es capaz de producir una proteína específica, significa que ese organismo posee un determinado gen que dicta cómo es que se va a “armar” dicha proteína. Por lo tanto, se estudiaron qué genes del hongo bioluminiscente *Neonothopanus nambi* le hacían falta a la planta para que también fuera capaz de emitir luz.

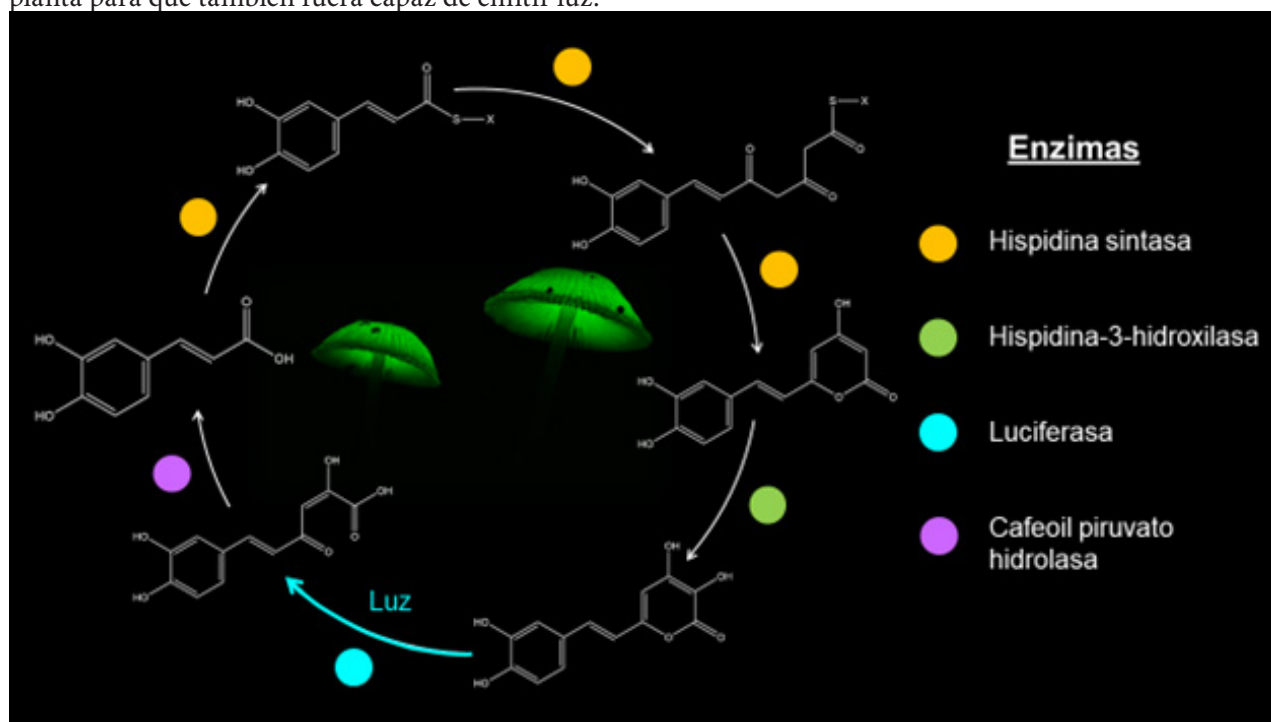
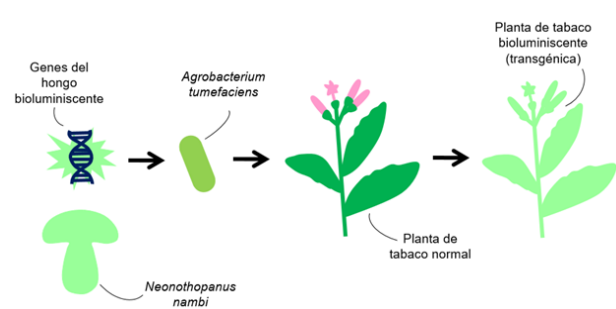


Figura 11. Ciclo del ácido cafeico. El diagrama muestra la serie de reacciones que incluye el ciclo del ácido cafeico de manera muy simplificada, los puntos de colores corresponden a las enzimas que aceleran cada reacción. Es posible observar que la hispidina sintasa incrementa la velocidad de tres reacciones, mientras que las demás enzimas solo catalizan una reacción. La luciferasa es la enzima que participa en la reacción responsable de la emisión de luz (señalada en azul). Nota: Adaptado de Bioluminescent Fungi (*Mycena* sp.) [Fotografía], por berniedup, 2013, Flickr (<https://flic.kr/p/ehQdYa>). CC BY-NC-SA 2.0. Elaboración propia.

Los genes del hongo bioluminiscente se insertaron en la bacteria *Agrobacterium tumefaciens*, con la finalidad de que infecte a la planta y le transfiera los genes del hongo (Figura 12). Esta es una estrategia muy utilizada para la modificación genética de las plantas (Nester, 2015). El resultado es una planta transgénica, porque se le insertaron genes de otra especie a través de ingeniería genética (Ivanova et al., 2018).



Es importante aclarar que todo el proceso anterior es una gran hazaña y no es tan simple como parece. Por cuestiones de derechos de autor no es posible mostrar las imágenes de las plantas bioluminiscentes en este artículo. Sin embargo, las imágenes y videos de las plantas bioluminiscentes del estudio se encuentran disponibles en <https://doi.org/10.1038/s41587-020-0500-9>. Son increíblemente preciosas. ¿Y todo esto para qué?, ¿solo para que las plantas se

Figura 12. Esquema general de la metodología para obtener una planta de tabaco bioluminiscente. Elaboración propia.

vean bonitas? ¡no! A pesar de su impresionante aspecto, la estética no es la finalidad de este proyecto. Los autores reportan que a medida que las plantas crecían, la luminiscencia aumentaba en la zona entre la raíz y el tallo. Asimismo, los brotes jóvenes eran los más brillantes y la luz se atenuaba conforme las plantas maduraban. Cabe mencionar que las flores fueron las partes que más bioluminiscencia produjeron, quizá algún día recibamos ramos de flores así de bonitas.

Por otro lado, si se lesionaban las hojas había un aumento de la emisión de luz en el lugar de la lesión. Dado lo anterior, los científicos señalan que es posible monitorear algunos procesos que ocurren en la planta, por ejemplo, su desarrollo, si presenta alguna enfermedad, su respuesta a condiciones ambientales y conocer los efectos de algún tratamiento químico que se pruebe en la planta. Consecuentemente, se propone realizar experimentos con plantas bioluminiscentes cultivadas en el suelo.

Otro dato interesante de este artículo es que la luminiscencia también puede ser “habilitada” en los animales, al insertarles los genes que “producen” a las enzimas tirosina amoniaco liasa y la cumarato 3-hidroxisasa o enzimas que realicen las mismas funciones que ellas.

Conclusión

Los hongos bioluminiscentes son seres que nos dejan anonadados. La comunidad científica ya los ha estudiado, pero aún guardan varios secretos por descubrir. No obstante, lo anterior no impide el avance de la ciencia, y la Biotecnología les ha dado aplicaciones dignas de una película de ciencia ficción.

Declaración de intereses

Las autoras declaran que no tienen intereses económicos o relaciones personales que puedan haber influido en la elaboración del presente artículo.

Agradecimientos

Al Dr. Enrique González Vergara de la Facultad de Ciencias Biológicas por el apoyo brindado en la elaboración y publicación del presente artículo.

Bibliografía

- Arrondo-Odrizola, E. (1985). Hongos luminosos. *Revista Catalana de Micología*, 9, 21–26. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5065421>
- Bechara, E. J. (2015). Bioluminescence: A fungal nightlight with an internal timer. *Current Biology*, 25(7), R283-R285.
- Bondar, V. S., Shimomura, O., & Gitelson, J. I. (2012). Luminescence of higher mushrooms. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология*, 5(4), 331-351.
- Chew, A. L. C., Desjardin, D. E., Tan, Y. S., Musa, M. Y., & Sabaratnam, V. (2015). Bioluminescent fungi from Peninsular Malaysia—a taxonomic and phylogenetic overview. In *Fungal Diversity* (Vol. 70, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s13225-014-0302-9>
- Dao, T. V. (2006). *Bioluminescence—The Mystery of the Nature. Research on Cultivation of Luminescent Mushroom*.
- Dauner, L. A., Karunarathna, S. C., Tibpromma, S., Xu, J., & Mortimer, P. E. (2021). Bioluminescent fungus *Roridomyces viridiluminus* sp. nov. and the first Chinese record of the genus *Roridomyces*, from Southwestern China. *Phytotaxa*, 487(3), 233-250.
- Dybas, C. L. (2019). Illuminating New Biomedical Discoveries Bioluminescent, biofluorescent species glow with promise. *BioScience*.
- Fraga, H. (2008). Firefly luminescence: A historical perspective and recent developments. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 7(2), 146–158. <https://doi.org/10.1039/b719181b>
- Gupta, V., Sengupta, M., Prakash, J., & Tripathy, B. C. (2016). Basic and applied aspects of biotechnology. *Basic and Applied Aspects of Biotechnology*, 1–520. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0875-7>
- Haddock, S. H. D., Moline, M. A., & Case, J. F. (2010). Bioluminescence in the sea. *Annual Review of Marine Science*, 2(1), 443–493. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081028>
- Hedda J. Weitz, Angela L. Ballard, Colin D. Campbell, Ken Killham, The effect of culture conditions on the mycelial growth and luminescence of naturally bioluminescent fungi, *FEMS Microbiology Letters*,

Volume 202, Issue 2, August 2001, Pages 165–170, <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2001.tb10798.x>

Jiménez, C. (2009). Biosensores: Aplicaciones y perspectivas en el control y calidad de procesos y productos alimenticios. *Vitae*, 16(1), 144-154.

Ivanova, N., Gugleva, V., Dobрева, M., Pehlivanov, I., Stefanov, S., & Andonova, V. (2018). Transgenic Plants: Gene Constructs, Vector and Transformation Method. *IntechOpen*, 42–61. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79369>

Ke, H. M., Lee, H. H., Chan-Yi Ivy Lin, Liu, Y. C., Lu, M. R., Hsieh, J. W. A., Chang, C. C., Wu, P. H., Lu, M. J., Li, J. Y., Shang, G., Lu, R. J. H., Nagy, L. G., Chen, P. Y., Kao, H. W., & Tsai, I. J. (2020). *Mycena* genomes resolve the evolution of fungal bioluminescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(49), 31267–31277. <https://doi.org/10.1073/pnas.2010761117>

Mahish, P. K., Chandrawanshi, N. K., Kunjam, S., & Jadhav, S. K. (2021). Opportunities in the Living Lights: Special Reference to Bioluminescent Fungi. *Energy: Crises, Challenges and Solutions*, 191-207.

Mihail, J. D., Bilyeu, L., & Lalk, S. R. (2018). Bioluminescence expression during the transition from mycelium to mushroom in three North American *Armillaria* and *Desarmillaria* species. *Fungal biology*, 122(11), 1064-1068.

Mitiouchkina, T., Mishin, A. S., Somermeyer, L. G., Markina, N. M., Chepurnyh, T. V., Guglya, E. B., Karataeva, T. A., Palkina, K. A., Shakhova, E. S., Fakhranurova, L. I., Chekova, S. V., Tsarkova, A. S., Golubev, Y. V., Negrebetsky, V. V., Dolgushin, S. A., Shalaev, P. V., Shlykov, D., Melnik, O. A., Shipunova, V. O., ... Sarkisyan, K. S. (2020). Plants with genetically encoded autoluminescence. *Nature Biotechnology*, 38(8), 944–946. <https://doi.org/10.1038/s41587-020-0500-9>

Nester, E. W. (2015). *Agrobacterium*: Nature's Genetic Engineer. *Frontiers in Plant Science*, 5(JAN), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00730>

Oliveira, A. G., Desjardin, D. E., Perry, B. A., & Stevani, C. V. (2012). Evidence that a single bioluminescent system is shared by all known bioluminescent fungal lineages. *Photochemical & photobiological sciences : Official journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology*, 11(5), 848–852. <https://doi.org/10.1039/c2pp25032b>

Oliveira, A. G., Stevani, C. V., Waldenmaier, H. E., Viviani, V., Emerson, J. M., Loros, J. J., & Dunlap, J. C. (2015). Circadian control sheds light on fungal bioluminescence. *Current Biology*, 25(7), 964-968.

Purtov, K. V., Petushkov, V. N., Baranov, M. S., Mineev, K. S., Rodionova, N. S., Kaskova, Z. M., ... & Yampolsky, I. V. (2015). The chemical basis of fungal bioluminescence. *Angewandte Chemie*, 127(28), 8242-8246.

Sato, A., Klaunberg, B., & Tolwani, R. (2004). In vivo bioluminescence imaging. *Comparative medicine*, 54(6), 631-634.

Teranishi, K. (2016). Localization of the bioluminescence system in the pileus of *Mycena chlorophos*. *Luminescence*, 31(2), 594–599. <https://doi.org/10.1002/bio.3001>

Verma, A. S., Agrahari, S., Rastogi, S., & Singh, A. (2011). Biotechnology in the realm of history. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 3(3), 321–323. <https://doi.org/10.4103/0975-7406.84430>

Waldenmaier, H. E., Oliveira, A. G., Loros, J. J., Dunlap, J. C., & Stevani, C. V. (2015). Circadian rhythm in fungal bioluminescence: nature's bright idea. *TODAY Microbiology*, 98.

Wilson, K., Yu, J., Lee, A., & Wu, J. C. (2008). In vitro and in vivo Bioluminescence Reporter Gene Imaging

Figuras

berniedup. (2013, 12 abril). Bioluminescent Fungi (*Mycena* sp.) [Fotografía]. Flickr. <https://flic.kr/p/ehQdYa>

Nicky Bay, (2021, 4 mayo). Bioluminescent mushrooms (*Filoboletus manipularis*) - DSC_1885s. Flickr. <https://www.flickr.com/photos/nickadel/51161862179/in/album-72157719118537027/>

quapan. (2017, 11 marzo). non-covalent hydrogen bonds betwixt base pairs of the DNA-Double-Helix visualized through an electron microscope [Fotografía]. Flickr. <https://flic.kr/p/SEG81X>

Ryan, V. (2015, 10 enero). *Mycena chlorophos* [Fotografía]. Flickr. <https://flic.kr/p/qPBjKM>

siddarth.machado. (2016, 29 septiembre). Bio-luminescent fungi [Fotografía]. Flickr. <https://flic.kr/p/MfHjRK>

slworking. (2020, 8 mayo). Some more photos of the bioluminescent tide at Dog Beach (Del Mar North Beach) in Del Mar. [Fotografía]. Flickr. <https://flic.kr/p/2j1aHQp>
Smoken Mirror. (2010, 7 marzo). Avatar Shmavatar [Fotografía]. Flickr. <https://flic.kr/p/7HXP>
Smoken Mirror. (2010, 4 marzo). Lights on, lights off [Fotografía]. Flickr. <https://www.flickr.com/photos/gusveitch/4407330651/in/album-72157623556574136/>