

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

Abril - Junio 2022

ISSN: 2683-2607

No. 124

**El Borrego Cimarrón:
historia natural, manejo y monitoreo**

**Importancia de la estructura
y plegamiento en las proteínas:
enfermedades, terapia y usos
en biotecnológicos**

**Efectos tóxicos de MOF
luminiscentes**



Contenido

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

No. 124 Abril - Junio 2022

Editorial	3	<i>Ponte las pilas: desecha seguro</i>	
		Ing. Amb. Marisela Cruz Rivera	45
		Dra. Alejandra M. Navarrete López	
		Dr. Ulises Rojas Zamora	
		Dra. Mónica L. Salazar Peláez	
<i>El Borrego Cimarrón: historia natural, manejo y monitoreo</i>	5	<i>Efectos tóxicos de MOF luminiscentes</i>	59
M. C. Enrique de Jesús Ruiz Mondragón		Ing. Yuritxi Merary Mendoza Silva	
Dr. Guillermo Romero Figueroa		Dra. Sandra Loera Serna	
<i>Aplicación de hongos ligninolíticos para la biorremediación de aguas contaminadas con colorantes</i>	15	Fe de erratas	70
Ing. Beatriz Paulina von Ziegler Muñoz			
Ing. Tamara Carolina Espinosa Aguilar			
<i>Importancia de la estructura y plegamiento en las proteínas: enfermedades, terapia y usos en biotecnológicos</i>	34		
Lic. Felipe de Jesús Vázquez Alba			
Dr. Hugo Nájera Peña			

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

en la WEB

Lea los artículos publicados en
<https://contactos.izt.uam.mx/>

Rector General

Dr. José Antonio de los Reyes Heredia.

Secretaria General

Dra. Norma Rondero López.

UNIDAD IZTAPALAPA

Rectora

Dra. Verónica Medina Bañuelos.

Secretario

Dr. Juan José Ambriz García.

*Director de la División de Ciencias Básicas
e Ingeniería*

Dr. Román Linares Romero.

*Director de la División de Ciencias Biológicas
y de la Salud*

Dr. José Luis Gómez Olivares.

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería:

Consejo Editorial:

Dra. Verónica Medina Bañuelos,

Dr. Juan José Ambriz García,

Dr. Román Linares Romero,

Dr. José Luis Gómez Olivares.

UAM- Iztapalapa

Editora en Jefe:

M. C. Alma Edith Martínez Licona.

Comité Editorial por CBS:

Dra. Edith Arenas Ríos, Dra. Laura Jose-
fina Pérez Flores, Dr. Pedro Luis Valverde
Padilla,

Por CBI:

Dr. Hugo Ávila Paredes.

Por la Universidad Iberoamericana:

Mtro. Adolfo G. Fink – Pastrana.

CONTACTOS, REVISTA DE EDUCACIÓN EN CIENCIAS E INGENIERÍA. 3ª Época, No.

124, Abril - Junio 2022, es una publi-
cación trimestral de la Universidad Autó-
noma Metropolitana a través de la Uni-
dad Iztapalapa, División de Ciencias Bási-
cas e Ingeniería y División de Ciencias
Biológicas y de la Salud. Prolongación Ca-
nal de Miramontes 3855, Col. Ex-Hacienda
San Juan de Dios, Alcaldía Tlalpan, C.
P. 14387, México, Ciudad de México y
Av. San Rafael Atlixco No. 186, Edificio
T174, Col. Vicentina, Alcaldía Iztapalapa,
C. P. 09340, México, Ciudad de México, Tel.
5804 – 4634 Página electrónica de la revista:
<https://contactos.izt.uam.mx/> y direc-
ción electrónica: cts@xanum.uam.mx Edito-
ra responsable MC Alma E. Martínez Li-
cona. Certificado de Reserva de Derechos
al Uso Exclusivo de Título No. 04-2013-
042212044000-203, ISSN 2683-2607, ambos
otorgados por el Instituto Nacional del De-
recho de Autor. Responsable de la última
actualización de este número, Mtra. Alma
E. Martínez Licona; Unidad Iztapalapa, Di-
visión de CBI y CBS; fecha de última mo-
dificación 30 de Junio de 2022. Tamaño del
archivo 37.1 MB.

Las opiniones expresadas por los autores no
necesariamente reflejan la postura del editor
de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproduc-
ción total o parcial de los contenidos e imá-
genes de la publicación sin previa autoriza-
ción de la Universidad Autónoma Metropol-
itana.

Fecha de Publicación: Abril - Junio de 2022.

Los artículos publicados en **Contactos, Revista de Educación en Ciencias e
Ingeniería** son sometidos a arbitraje; para ello se requiere enviar por mail el trabajo en
Word. Toda correspondencia deberá enviarse a:

Comité Editorial de **Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería,**

UAM – Iztapalapa, T – 174, Tel. 5804-4634

Av. San Rafael Atlixco No. 186, C. P. 09340, CDMX.

Apartado Postal 55 -534

<https://contactos.izt.uam.mx/> e-mail cts@xanum.uam.mx

Editorial

Hemos llegado a la mitad de este año con un número interesante, nuestros amables lectores encontrarán artículos de diversos temas, los cuales esperamos sean de su agrado.

En el artículo “Aplicación de hongos ligninolíticos para la biorremediación de aguas contaminadas con colorantes”, se busca crear conciencia en cuanto a la importancia de atender los problemas de contaminación del agua con colorantes, por ello se realizó una revisión bibliográfica de los métodos de biorremediación de colorantes empleados en procesos industriales, mediante el uso de hongos ligninolíticos.

Siguiendo con el tema del cuidado del medio ambiente y de la salud humana tenemos el artículo “Ponte las pilas: desecha seguro”, en el, se habla sobre el aumento de la demanda de dispositivos de almacenamiento de energía. El problema asociado con este fenómeno es que las pilas pueden contener en su estructura diferentes elementos de impacto nocivo en la salud humana y el ambiente. Por ello, se han diseñado diferentes normas y programas que ayudan a la adecuada disposición de estos dispositivos al final de su vida útil.

Continuando con los problemas del medio ambiente tenemos el artículo “El Borrego Cimarrón: historia natural, manejo y monitoreo”, en este artículo se abarca la problemática para su conservación. Este animal vive en las sierras desérticas del noroeste de México; región en donde es una especie muy valorada y por tanto se procura su conservación por medio del manejo de sus poblaciones. Este manejo consiste en atender las problemáticas a las que se enfrenta la especie en los lugares donde se distribuye: falta de agua, propagación de enfermedades, destrucción del hábitat, cacería furtiva, entre otras. Por otro lado, el manejo del borrego Cimarrón se basa en los resultados del monitoreo de sus poblaciones pues estos son la base científica que guía la toma de decisiones.

Estos son ejemplos de los temas de este número, dejando al usuario el descubrimiento del resto del contenido, esperando sea de su interés.

Atentamente

MC Alma E. Martínez L.
Editora en Jefe



Información para autores

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería, Revista dirigida a profesores y a estudiantes de estas disciplinas.

Está registrada en el índice de revistas de divulgación de Conacyt, así como en Latindex, Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.

Para publicar, los trabajos deberán ser originales y accesibles a un público amplio con formación media superior o universitaria pero no especializada; los temas deberán presentarse en forma clara. Cada colaboración debe incluir figuras, diagramas, ilustraciones, fotografías, etc. (otorgando el crédito correspondiente en caso de no ser original), que hagan más accesible la presentación.

Las secciones que la constituyen son:

1. Divulgación. Artículos que presentan temas científicos con enfoques novedosos y accesibles (15 cuartillas).

2. Educación científica. Enfoques originales en la enseñanza de temas particulares (15 cuartillas).

3. Artículos especializados. Reportes breves de investigación, relacionados con una problemática concreta (15 cuartillas).

4. Crónicas. Historia y desarrollo de conceptos científicos, así como teorías alternativas (15 cuartillas).

5. Divertimentos. Juegos y acertijos intelectuales (5 cuartillas).

6. Noticias breves. Información de actualidad en el mundo de la ciencia (4 cuartillas).

7. Los laureles de olivo. Los absurdos de la vida cotidiana y académica (4 cuartillas).

En todos los casos se debe incluir los nombres completos de los autores con su adscripción, dirección, teléfono y dirección de correo electrónico.

Normas

Las colaboraciones a las secciones 1 a 4 deberán ajustarse a las siguientes normas:

1. Resumen escrito en español e inglés.
2. 4 palabras clave en español en inglés.
3. Cuando se incluya una abreviatura debe explicarse por una sola vez en la forma siguiente: Organización de los Estados Americanos (OEA)...
4. Cuando se utilice un nombre técnico o una palabra característica de una disciplina científica deberá aclararse su significado de la manera más sencilla

posible.

5. Las citas textuales deberán ir de acuerdo al siguiente ejemplo: En cuanto la publicación del placebo se asevera que “el efecto placebo desapareció cuando los comportamientos se estudiaron en esta forma” (Núñez, 1982, p.126).

6. Las referencias (no más de 10) se marcarán de acuerdo al siguiente ejemplo: Sin embargo, ese no es el punto de vista de la Escuela de Copenhague (Heisenberg, 1958), que insiste en...

7. Al final del artículo se citarán las referencias por orden alfabético de autores. Pueden añadirse lecturas recomendadas (no más de 5).

8. Cada referencia a un artículo debe justarse al siguiente formato: Szabadváry, F. y Oesper, E., Development of the pH concept, J. Chem. Educ, 41 [2], pp.105 -107, 1964.

9. Cada referencia a un libro se ajustará al siguiente formato: Heisenberg, W., Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science, Harper Torchbook, Nueva York, pp.44-58, 1958. 10. Para páginas electrónicas: dirección (fecha de acceso).

11. Los títulos de reportes, memorias, etcétera, deben ir subrayados o en itálicas.

Envío y características del artículo

El envío del artículo deberá ser en archivo electrónico, en Word, tipo de letra Time New Roman, tamaño 12 con interlineado sencillo y uso de editor de ecuaciones.

En el caso de ilustraciones por computadora (BMP, JPG, TIFF, etc.) envíelos en archivos por separado. El material es recibido en:

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería.

UAM – Iztapalapa, T-174,

Información: cts@xanum.uam.mx, tel. 5804-4634

Av. San Rafael Atlixco, 186, C. P. 09340,

CDMX. A.P. 55-534

Arbitraje

El Comité utiliza un sistema de arbitraje anónimo que requiere un mes. Se entiende que los autores no han enviado su artículo a otra revista y que dispondrán de un plazo máximo de un mes para incorporar las observaciones de los árbitros.

La decisión final de publicar un artículo es responsabilidad exclusiva del Comité Editorial.



El Borrego Cimarrón: historia natural, manejo y monitoreo

**M. en C. Enrique de Jesús Ruiz Mondragón
Dr. Guillermo Romero Figueroa
Facultad de Ciencias
Universidad Autónoma de Baja California**

Abstract

In the world there are six species of wild sheep that inhabit the mountain ranges of Europe, Asia and North America. One of them is the bighorn sheep; animal whose distribution includes the desert mountain ranges of northwestern Mexico; region where it is a highly valued species and therefore its conservation is sought through the management of its populations. This management consists of addressing the problems faced by the species in the places where it is distributed: lack of water, disease spread, habitat destruction, poaching, among other. On the other hand, the management of the bighorn sheep is based on the results of the monitoring of their populations since these are the scientific basis that guides decision-making.

Keywords

Ovis, bighorn, management, monitoring.

Resumen

En el mundo existen seis especies de borregos silvestres que habitan las cadenas montañosas de Europa, Asia y Norteamérica. Una de ellas es el borrego Cimarrón; animal cuya distribución abarca las sierras desérticas del noroeste de México; región en donde es una especie muy valorada y por tanto se procura su conservación por medio del manejo de sus poblaciones. Este manejo consiste en atender las problemáticas a las que se enfrenta la especie en los lugares donde se distribuye: falta de agua, propagación de enfermedades, destrucción del hábitat, cacería furtiva, entre otras. Por otro lado, el manejo del borrego Cimarrón se basa en los resultados del monitoreo de sus poblaciones pues estos son la base científica que guía la toma de decisiones.

Palabras clave

Ovis, Cimarrón, manejo, monitoreo.

Historia Natural

Conocemos como borregos a todas las especies del género *Ovis*. Grupo taxonómico en el que se encuentran los mamíferos ungulados (con pezuñas) y rumiantes (con el estómago dividido en cámaras), cuyos machos y hembras tienen cornamenta —regla que solo aplica para las especies silvestres pues hay algunas razas domésticas en las que los machos o las hembras carecen de estas estructuras y en su lugar tienen pequeños abultamientos o depresiones de poca profundidad— y que, además, poseen tres glándulas exocrinas (órganos que producen sustancias que tienen una función específica y que se liberan al exterior del animal por medio de un conducto excretor): glándulas preorbitales, que se ubican frente a los ojos y son usadas por los machos dominantes para marcar tanto su territorio como a sus subordinados —crías, juveniles y hembras— a quienes impregna con su aroma tras frotar su cabeza contra el cuerpo de estos últimos; glándulas interdigitales, que están entre las pezuñas y cuya función es la de marcar con un rastro de olor los senderos por los que transitan sus rebaños; glándulas inguinales, que se sitúan en la ingle y le sirven a los borregos para comunicar su disponibilidad reproductiva (Geist, 1971; Hansen, 1980b).

En el mundo existen siete especies que pertenecen al género *Ovis*, una que es doméstica, el borrego común (*O. aries*), y seis que son silvestres: el argali (*O. ammon*), que habita en Asia central; el urial (*O. vignei*), que se encuentra en el medio oriente; el muflón (*O. orientalis*), de Europa; el borrego siberiano (*O. nivicola*),

que mora en las montañas del noreste de Rusia; el borrego de Dall (*O. dalli*), que reside en Alaska y Canadá; el borrego Cimarrón (*O. canadensis*), que se distribuye desde el sur de Canadá hasta el norte de México (Rezaei *et al.*, 2010; Fig. 1).

Del borrego Cimarrón existen dos variedades: el borrego de montaña y el borrego de desierto que se diferencian porque el primero es más grande, robusto y de pelaje más denso que el segundo. El borrego de montaña habita en Canadá y Estados Unidos; el borrego de desierto, en Estados Unidos y México (Geist, 1971; Monson, 1980). En México existen poblaciones de cimarrones en vida libre en la península de Baja California y en Sonora, aunque, también, hay poblaciones de borregos en cautiverio en la Isla Tiburón (Sonora), en la Isla del Carmen (Baja California Sur) y en algunas Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA's) en los estados de Chihuahua y Coahuila (Sandoval *et al.*, 2014).

El hábitat del borrego Cimarrón -y del resto de los borregos salvajes- lo constituyen las cadenas montañosas escarpadas: con

pendientes pronunciadas, profundos acantilados y grandes cañones. Las montañas en las que habita la variedad de desierto se encuentran en algunas de las regiones más calurosas y secas de Norteamérica donde es capaz de sobrevivir gracias a su comportamiento ya que estos animales pasan la mayor parte del día echados en espacios sombreados y bien ventilados, realizan la mayoría de sus actividades al amanecer y pocas horas antes de la puesta del sol, y permanecen cerca de los cuerpos de agua (Hansen, 1980a).

La dieta del borrego Cimarrón la constituye una gran variedad de plantas, más de 100 especies distintas, y su composición específica está en función del tipo de vegetación que se encuentra en cada una de sus áreas de distribución. No obstante, los estudios que se han hecho referentes a este tema han demostrado que en orden de importancia se alimenta de arbustos, hierbas, cactáceas, agaváceas, árboles y pastos (Browning y Monson, 1980; Cárdenas *et al.*, 2016).

El ciclo de vida del borrego Cimarrón se inicia con el nacimiento de las crías -etapa en la que son más vulnerables estos

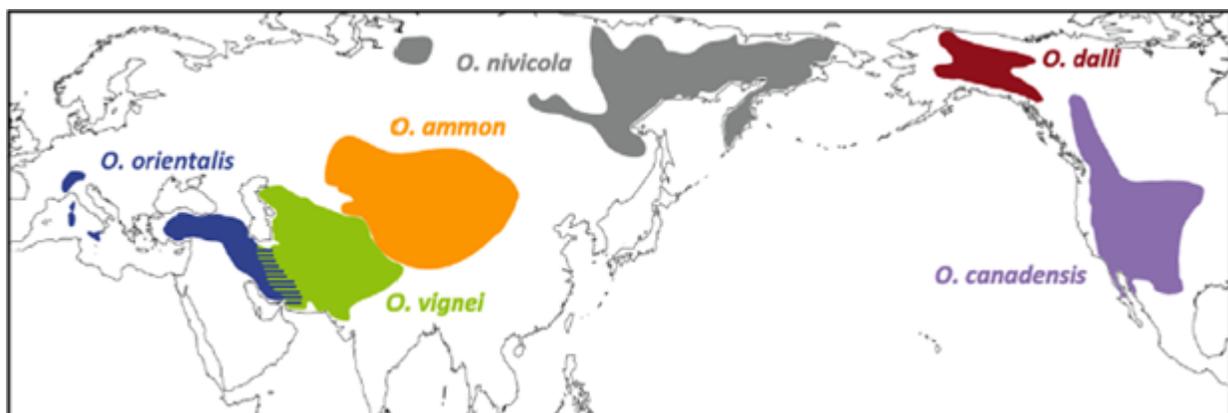


Figura 1. Distribución mundial del género *Ovis* (Rezaei *et al.*, 2010).

animales- las cuales si son hembras serán sexualmente maduras a los dieciocho meses mientras que si son machos podrán participar en la disputa por las hembras hasta los seis años. La temporada de apareamiento del borrego de desierto es de julio a enero en tanto que la del borrego de montaña es de noviembre a diciembre, diferencia que se debe a que en el hábitat de la variedad de montaña hay un régimen de lluvias regular no así en el hábitat de la variedad de desierto donde las lluvias son más impredecibles lo que obliga a las hembras a estar en celo solo cuando las condiciones del entorno son óptimas. La gestación tiene una duración de entre 173 y 185 días; periodo tras el que dan a luz comúnmente a una sola cría y rara vez a dos. La esperanza de vida promedio de los borregos es de doce años (Geist, 1971; Turner y Hansen, 1980; Fig. 2).

Manejo

El manejo del borrego Cimarrón lo podemos definir como todo aquello que se hace para administrar, regular y dirigir el

uso que se le da la especie. Es por lo que, el manejo del borrego Cimarrón es tan diverso como el número de lugares en los que se distribuye pues en cada uno de ellos las problemáticas que afectan a la especie son diferentes, por ejemplo: en una sierra de Nuevo México los borregos tienen una deficiencia de sodio durante el verano por lo que se ven obligados a desplazarse a unas montañas aledañas en las que dicho mineral está disponible, pero donde son vulnerables a la depredación de modo que tras cada uno de estos desplazamientos los rebaños de cimarrones suelen perder miembros; por lo tanto, la medida que se tomó para disminuir la mortalidad de borregos causada por este movimiento estacional fue la de colocar piedras enriquecidas con sodio en el hábitat de los animales para que estos las lamieran y suplieran así las deficiencias que tenían de este mineral (Watts y Schemnitz, 1985). Como es de suponer, la medida que se tomó en el ejemplo fue muy exitosa e incremento el número cimarrones en el área donde se implementó; no obstante, difícilmente en otro sitio esta medida será igual de efectiva

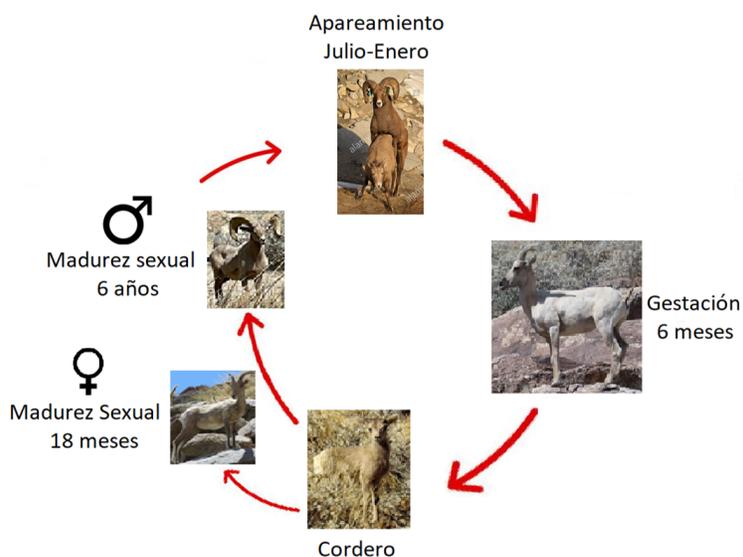


Figura 2. Ciclo de vida de la variedad de desierto del borrego Cimarrón.

e incluso cabría esperar que en ciertos lugares fuese irrelevante ya que se realizó en respuesta a una situación muy particular.

A pesar de la diverso que es el manejo del borrego Cimarrón, los especialistas en el tema señalan que este implica obligadamente la realización de cinco actividades: el mantenimiento y construcción de cuerpos de agua, la vigilancia del hábitat, la erradicación de fauna feral (animales domésticos que no están bajo el control del hombre y que se han establecido en el medio silvestre) y doméstica del área de distribución de los borregos, el aprovechamiento económico de los animales y el monitoreo de la población de la especie.

El mantener en buen estado los cuerpos de agua que utiliza el borrego Cimarrón es indispensable para asegurar la conservación de la especie en cualquier área desértica donde se distribuye puesto que si bien es cierto que estos animales poseen un sistema digestivo capaz de extraer la mayor parte del agua que contienen los alimentos que consume y que, además, suelen alimentarse de cactáceas para complementar su hidratación; necesitan tomar agua periódicamente para sobrevivir pues la que obtienen por estos medios no es suficiente para cubrir sus necesidades (Turner y Weaver, 1980). Por otro lado, ya que el agua es un factor que limita el tamaño de las poblaciones de la especie en las regiones desérticas la construcción de cuerpos de agua artificiales ha demostrado ser una medida que ha incrementado significativamente el número de borregos en los lugares donde se ha implementado (Foster *et al.*, 2005); dicha infraestructura puede ser tan sencilla como una pileta de metal de 1 m³ que capte agua durante la temporada de lluvia o tan compleja como un bebedero de cemento con

techo de lámina —para disminuir la pérdida de agua por evaporación— conectado a un par de tinacos de 10,000 L por medio de un sistema de tuberías equipado con un temporizador que dosifique el suministro de agua y el cual obtenga la energía eléctrica para funcionar de paneles solares (Fig. 3). En México, la instalación de bebederos es una práctica común en los lugares donde se maneja el borrego Cimarrón; medida que frecuentemente se complementa con la colocación de comederos que se abastecen con suplementos alimenticios especiales para la especie (CEMEX, 2021).

Los animales ferales y domésticos son una gran amenaza para el borrego Cimarrón debido a que compiten por los recursos disponibles; destruyen el hábitat; contaminan los cuerpos de agua y las áreas de alimentación con virus, bacterias y parásitos que provocan enfermedades gastrointestinales y respiratorias, principalmente (Jones, 1980).

La vigilancia se centra en evitar la cacería furtiva y la extracción ilegal de recursos forestales debido a que la primera es una actividad que merma las poblaciones de borregos, capaz de acabar con todos los cimarrones de una región, mientras que la segunda disminuye la capacidad de carga del ecosistema que dependiendo de su intensidad puede llegar a ahuyentar indefinidamente a los rebaños de borregos del área donde se esté llevando a cabo dicha actividad (Graf, 1980).

En lo referente al aprovechamiento económico del borrego Cimarrón, cabe destacar que esta es una especie de muy alto valor monetario en el mercado cinegético y la variedad de desierto es la que alcanza los precios más elevados puesto que el costo de un permiso para su cacería oscila



Figura 3. Cuerpo de agua artificial para el borrego Cimarrón. Tomado de: <https://www.gohunt.com/read/news/nevada-performs-emergency-water-hauls-to-guzzlers-in-order-to-save-bighorn-sheep-population#gs.8k9gc6>.

comúnmente entre los \$45,000 y \$80,000 USD; sin embargo, un buen ejemplar puede llegar a cotizarse en más de \$250,000 USD (Lee, 2011; Wild Sheep Foundation, 2022). No obstante, no solo con la cacería deportiva es posible obtener beneficios económicos del borrego Cimarrón, sino que además es posible aprovecharlo por medio de actividades ecoturísticas que también generan importantes ingresos: tours de vida silvestre, campamentos, talleres de fotografía, solo por mencionar algunos.

Monitoreo

El monitoreo de la población del borrego Cimarrón consiste en la toma sistemática de datos de alguna de sus cualidades y, por lo tanto, puede ser tan diverso como lo deseemos ya que es posible monitorear un gran número de propiedades de una población: salud, alimentación, movimientos

estacionales, genética... Sin embargo, los atributos de la población de mayor relevancia para el manejo del borrego Cimarrón son el tamaño y la estructura, debido a que estos indican el estado de conservación en el que se encuentra, su tendencia (si está creciendo o decreciendo) y en caso de realizar un aprovechamiento cinegético permitirá determinar el número de animales que podrán cazarse. Por lo tanto, es la actividad de manejo más importante al ser la base científica que guiará la toma de decisiones (Nieblas y Zataráin, 2017; Ruiz, 2017).

El tamaño de la población es igual al número de borregos que la conforman mientras que la estructura de la población es la proporción que hay de los diferentes grupos que la conforman. Para evaluar la estructura de población del borrego Cimarrón los investigadores agrupan a los

borregos en ocho clases (Geist, 1971; Fig. 4):

- Crías: Se les llama así a los borregos menores de un año. A esta edad sus cornamentas son pequeñas protuberancias y su pelaje es de color gris ceniza.
- Hembras jóvenes: En esta clase se incluye a las hembras de entre catorce y veinticuatro meses. Su cuerpo es más grande que el de las crías, pero no tanto como el de una hembra adulta; su cornamenta es corta y recta; su pelaje es del mismo color que el de los adultos.
- Hembras adultas: Son las hembras mayores de dos años. Se diferencian de las hembras jóvenes porque además de ser más grandes, tienen un rostro más alargado y sus cornamentas tienen forma de *media luna*.
- Machos añeros: A este grupo pertenecen los machos de entre catorce y veinticuatro meses. Son muy parecidos a las hembras adultas, tanto así que un observador inexperto sería incapaz de diferenciar uno de otro, aunque su rostro es más corto y su cornamenta esta más curvada hacia afuera.
- Machos clase I: Son Machos de entre dos y tres años. Sus cornamentas son gruesas en la base y comienzan a curvarse hacia abajo. En cuanto a su tamaño, son tan grandes como una hembra adulta totalmente desarrollada (de entre cuatro y cinco años).
- Machos clase II: En este grupo están los machos de entre tres y seis años. Son más grandes que los animales de la clase que los precede. Sus cornamentas también están más desarrolladas pues a esta edad alcanzan a formar un medio círculo.
- Machos clase III: Clase conformada por machos de entre seis y ocho años. Son más grandes que los animales de la clase que los precede. El desarrollo de su cornamenta continua con las puntas dirigiéndose hacia enfrente hasta estar al nivel de los ojos.
- Machos clase IV: En esta se agrupa a los machos mayores de ocho años. Son los borregos de mayor talla corporal. Las puntas de sus cornamentas cuando están rotas se extienden cuando menos hasta el nivel de los ojos, pero cuando están intactas se prolongan mucho más allá de esta altura.

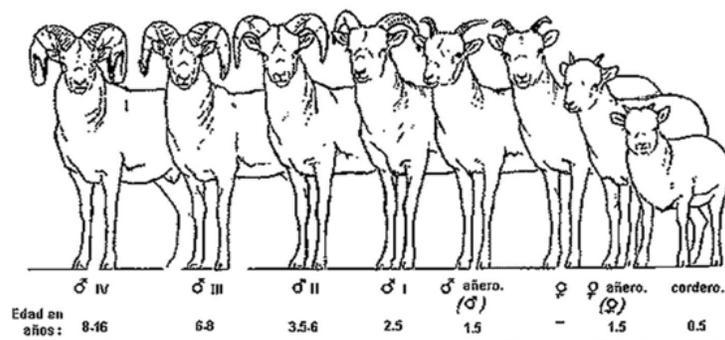


Figura 4. Sexos y clases de edad del borrego Cimarrón (Geist, 1971).

Tres son los métodos que los especialistas utilizan para monitorear el tamaño y la estructura de la población del borrego Cimarrón: monitoreo aéreo, transectos lineales y estaciones de fototrampeo. El monitoreo aéreo se realiza en un helicóptero capaz de maniobrar por las serranías que habitan los animales. Este método tiene la ventaja de que permite evaluar rápidamente el tamaño y la estructura de la población del borrego Cimarrón pues, por ejemplo, en alrededor de 40 h de vuelo es posible cubrir toda el área de distribución del borrego Cimarrón en todo el estado de Baja California y obtener resultados confiables (Lee *et al.*, 2012). La desventaja de este tipo de monitoreo es el costo, ya que es el más caro de los tres, debido a los precios del combustible, de la renta del helicóptero y del salario del piloto.

Los transectos lineales, también conocidos como monitoreo terrestre, son rutas que se trazan en un área específica y que son recorridas a pie, a caballo o en vehículo —lo que dependerá de la longitud y transitabilidad del transecto— por un grupo de observadores (Simmons y Hansen, 1980; Ruiz, 2014). En lo referente al costo, un monitoreo terrestre es casi tan caro como uno aéreo; en cuanto al tiempo, por tierra se podrían requerir de hasta seis meses para cubrir un área que por aire se recorre en 40 h. No obstante, el uso de transectos lineales para el estudio de la población del borrego Cimarrón tiene algunas ventajas sobre los monitoreos aéreos: se crean empleos temporales pues se contratan a personas locales para desempeñar diferentes actividades (guías, cocineros, arrieros, ayudantes generales); se produce una derrama económica en las comunidades contiguas al área de estudio por los gastos que se hacen en insumos y

servicios (alimentos, hospedaje, renta de caballos); y cada recorrido de monitoreo es, también, uno de vigilancia que además puede aprovecharse para realizar actividades de mantenimiento o mejoramiento del hábitat.

El monitoreo por medio de estaciones de fototrampeo consiste en colocar una serie de cámaras trampa en los lugares donde se sabe que hay una gran actividad del borrego Cimarrón —que generalmente es en los cuerpos de agua— y programarlas para que tomen una fotografía o un vídeo cada que un animal se encuentre dentro de su rango de alcance (Perry *et al.*, 2010). Este es el método más económico para determinar el tamaño y la estructura de la población de la especie pues no se requiere de una gran cantidad de personal para su ejecución ni tampoco es necesario hacer extensos recorridos en las áreas de estudio para generar la información de interés, comparados con los que se tendrían que hacer en un monitoreo aéreo o terrestre. Además, un monitoreo con cámaras trampa no solo genera registros de borregos, sino que, también del resto de la fauna silvestre que se distribuye en su hábitat. Sin embargo, las estaciones de fototrampeo tienen la limitante de que su viabilidad es inversamente proporcional al tamaño del área que se va a monitorear, es decir: es un método muy efectivo para un predio, un ejido e incluso para toda una sierra pero que difícilmente se podría aplicar en todo el estado de Baja California. Otro de los puntos en contra del fototrampeo es el tiempo, pues se pueden requerir hasta seis meses de monitoreo para obtener resultados confiables.

Conclusiones

El borrego Cimarrón es un animal con

una historia natural muy interesante cuyo adecuado manejo es esencial para asegurar su conservación. Por otro lado, el monitoreo de sus poblaciones no es tarea fácil debido a que, independientemente del método que se elija para realizarlo, requiere de un gran esfuerzo logístico que debe ser coordinado por especialistas en la materia.

Referencias

- Browning, B. y Monson, G., Food, In: Monson, G. y Sumner, L. (Ed.), *The desert bighorn: it's life history, ecology & management*, The University of Arizona Press, Tucson, pp. 80-97, 1980.
- Cárdenas, I., Gallina, S., Corcuera, P., Álvarez, S. y Ramírez, R., Diet composition and selection of the bighorn sheep (*Ovis canadensis*) in Sierra El Mechudo, Baja California Sur, Mexico, *Therya*, 7[3], pp.423-438, 2016. Disponible en: https://www.revistas-conacyt.unam.mx/therya/index.php/THERYA/article/view/394/html_251.
- CEMEX, CEMEX refuerza compromiso de conservación con liberación de especie, 2021. Disponible en: <https://www.cemex.com/es/-/cemex-reinforces-conservation-commitment-with-species-release>.
- Foster, J., Harveson, L. y Pittman, M., Use of guzzlers by bighorn sheep in the Chihuahuan Desert, *Desert Bighorn Council Transaction* 48, pp.12-22, 2005. Disponible en: https://bri.sulross.edu/pubs/proceedings/DBC2005_sm.pdf.
- Geist, V., *Mountain sheep: a study in behavior and evolution*. University of Chicago, Illinois, 383 p., 1971.
- Graf, W., Habitat protection and improvement, In: Monson, G. y Sumner, L. (Ed.), *The desert bighorn: it's life history, ecology & management*, The University of Arizona Press, Tucson, pp. 310-319, 1980.
- Hansen, C., Habitat, In: Monson, G. y Sumner, L. (Ed.), *The desert bighorn: it's life history, ecology & management*, The University of Arizona Press, Tucson, pp. 64-78, 1980a.
- Hansen, C., Physical characteristics, In: Monson, G. y Sumner, L. (Ed.), *The desert bighorn: it's life history, ecology & management*, The University of Arizona Press, Tucson, pp. 52-63, 1980b.
- Jones, F., Competition, In: Monson, G. y Sumner, L. (Ed.), *The desert bighorn: it's life history, ecology & management*, The University of Arizona Press, Tucson, pp. 197-216, 1980.
- Lee, R., Economic aspects of and the market for desert bighorn sheep, *Desert Bighorn Council Transactions* 51, pp.46-49, 2011. Disponible en: <https://www.desertbighornCouncil.com> ffl download.
- Lee, R., Martínez, R., Zataráin, J. y Escobar, J., Observations on the distribution and abundance of bighorn sheep in Baja California, Mexico, *California Fish and Game* 98[1], pp. 51-59, 2012. Disponible en: <https://nrm.dfg.ca.gov/FileHandler.ashx?DocumentID=67437&inline=1>.
- Monson, G., Distribution and abundance, In: Monson, G. y Sumner, L. (Ed.), *The desert bighorn: it's life history, ecology & management*, The University of Arizona Press, Tucson, pp. 40-51, 1980.

- Nieblas, E. y Zataráin, J., Conservación y manejo sustentable del borrego cimarrón en Baja California, In: Eaton R., Guevara, A. y Tapia, J. (Ed.), *Estudios sobre el borrego cimarrón en el noroeste de México*, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, pp.218-234, 2017.
- Perry, T., Newman, T. y Thibault, K., Evaluation of methods used to estimate size of a population of desert bighorn sheep (*Ovis canadensis mexicana*) in New Mexico, *The Southwestern Naturalist* 55[4], pp.517-524, 2010. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/40985940>.
- Rezaei, H., Naderi, S., Chintauan, I., Taberlet, P., Virk, A., Naghash, H., Rioux, D., Kaboli, M. y Pompanon, F., Evolution and taxonomy of the wild species of the genus *Ovis* (Mammalia, Artiodactyla, Bovidae), *Molecular Phylogenetics and Evolution* 54, pp.315-326, 2010. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1055790309004461>.
- Ruiz, E., *Estado actual de la población del borrego cimarrón (Ovis canadensis weemsi) en la UMA Ejido La Purísima, Baja California Sur, México* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Tlanepantla, 58 p., 2014. Disponible en: <http://132.248.9.195/ptd2014/septiembre/0719670/Index.html>.
- Ruiz, E., *Una propuesta de manejo para el hábitat del borrego cimarrón (Ovis canadensis), en Sierra Juárez, Baja California, México* (Tesis de Maestría), Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias, Ensenada, 97 p., 2017. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/1mtDMhh-zZV5AiJ8GE8P2cU5gNhuzRe2M/view>.
- Sandoval, A., Valdez, R. y Espinoza, A., El borrego cimarrón en México, En: *Ecología y manejo de fauna silvestre en México*, Editorial del Colegio de Postgraduados, Texcoco, pp. 489-518, 2014. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/283017881_El_borrego_cimarron_en_Mexico.
- Simmons, N. y Hansen, C., Population survey methods, In: Monson, G. y Sumner, L. (Ed.), *The desert bighorn: it's life history, ecology & management*, The University of Arizona Press, Tucson, pp. 260-272, 1980.
- Turner, J. y Hansen, C., Reproduction, In: Monson, G. y Sumner, L. (Ed.), *The desert bighorn: it's life history, ecology & management*, The University of Arizona Press, Tucson, pp. 145-151, 1980.
- Turner, J. y Weaver, R. Water, In: Monson, G. y Sumner, L. (Ed.), *The desert bighorn: it's life history, ecology & management*, The University of Arizona Press, Tucson, pp. 100-112, 1980.
- Watts, T. y Schemnitz, S., Mineral lick use and movement in a remnant desert bighorn sheep population, *The Journal of Wildlife Management* 49[4], pp.994-996, 1985. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/3801385>.
- Wild Sheep Foundation (fecha de consulta 12 de febrero de 2022). Disponible en: <https://bid.wildsheepfoundation.org/auctionlist.aspx?dv=2>.

Aplicación de hongos ligninolíticos para la biorremediación de aguas contaminadas con colorantes

**Ing. Beatriz Paulina von Ziegler Muñoz
Ing. Tamara Carolina Espinosa Aguilar
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad La Salle**

**Dr. Alejandro Islas García
Vicerrectoría de Investigación
Universidad La Salle**

Abstract

Due to the impact produced by human activities, different methodologies have been developed to mitigate and counteract the possible adverse effects on the environment. It occurs the same way for soil, air and water bioremediation.

This article seeks to call attention to the importance of addressing water pollution with dyes. Due to the above, a bibliographic review of the bioremediation methods used for treating dye contaminated water through the use of ligninolytic fungi was elaborated, while highlighting the most used species, as well as their mechanisms of action through the different enzymes involved. Likewise, the article highlights the need to reform environmental legislation, which should function as a tool to mitigate the ecological impact caused by the high concentration of colorants in industrial effluents.

Keywords

Biodegradation, ligninolytic enzymes, textile industry.

Resumen

Debido al impacto que generan las actividades humanas, se han desarrollado distintas metodologías para mitigar y contrarrestar los posibles efectos adversos sobre el medio ambiente. Tal es el caso de la biorremediación de suelo, aire y agua. En el presente artículo se busca crear conciencia en cuanto a la importancia de atender los problemas de contaminación del agua con colorantes, por ello se realizó una revisión bibliográfica de los métodos de biorremediación de colorantes empleados en procesos industriales, mediante el uso de hongos ligninolíticos o de la podredumbre blanca, destacando las

especies más utilizadas, así como sus mecanismos de acción a través de las diferentes enzimas involucradas. Asimismo, se pone de manifiesto los efectos adversos de estos contaminantes y la necesidad de reformar la legislación en materia ambiental, que debería fungir como una herramienta para mitigar el impacto ecológico ocasionado por la alta concentración de colorantes en los efluentes industriales.

Palabras clave

Biodegradación, enzimas ligninolíticas, industria textil.

Introducción

Uno de los sectores industriales más contaminantes y con mayor impacto ambiental es el dedicado al ámbito textil, debido al alto consumo de agua requerida para llevar a cabo sus procesos y las altas concentraciones de contaminantes presentes en las aguas residuales. Alrededor de 700,000 toneladas anuales de colorantes sintéticos son producidas a nivel mundial. Por otro lado, se estima que del 10 al 15 % de los colorantes utilizados se pierden durante el proceso de tinción, en el cual el colorante que no es fijado al textil se libera en el efluente de la fábrica contaminando al cuerpo receptor (Mohammad et al, 2010). Por esta razón, en el presente documento se analiza el potencial de diferentes especies de hongos ligninolíticos para la biorremediación de colorantes industriales en cuerpos de agua contaminados.

Por lo que se refiere a los procesos de biorremediación, estos consisten en la descontaminación de un medio o material mediante el uso del potencial metabólico de organismos como hongos o bacterias, para transformar las sustancias en compues-

tos más simples y menos contaminantes (Hernández-Ruíz et al, 2017). En cuanto a los hongos ligninolíticos, también conocidos como los hongos de la podredumbre blanca, son aquellos que tienen la capacidad de producir enzimas extracelulares capaces de degradar la lignina de la madera: dichas enzimas también son catalíticamente activas sobre diversos sustratos orgánicos y contaminantes recalcitrantes (Dávila y Vázquez-Duhalt, 2006).

Los colorantes

Estos compuestos químicos xenobióticos no se encuentran de forma natural en la biosfera, sino que han sido sintetizados por el hombre (Moeller y Garzón, 2003). Debido a que los colorantes presentan una elevada complejidad estructural y no suelen obedecer las mismas tendencias en cuanto a propiedades fisicoquímicas, su tratamiento antes de liberarse al medio ambiente suele ser limitado o incluso nulo.

El vertimiento de aguas contaminadas por colorantes, además de ocasionar impactos estéticos negativos, afecta a los organismos acuáticos fotosintéticos o productores primarios, que garantizan el flujo de energía a niveles tróficos superiores (Barrios-Ziolo et al, 2016).

Por otro lado, los colorantes poseen una elevada capacidad de bioacumulación y baja velocidad de despolimerización, propiedades que los hacen muy persistentes (Garzón, 2009). Debido a lo anterior, la presencia de colorantes en el medioambiente sin previo tratamiento supone riesgos ecológicos a causa de las propiedades fisicoquímicas de dichas sustancias (Figura 1).

Panorama del uso de los colorantes y su normatividad

A pesar de que el uso y aplicación de colorantes industriales, textiles, alimenticios, entre otros, es extensa, no existe ninguna Norma Oficial Mexicana (NOM) que determine los límites máximos permisibles de colorantes en aguas residuales. Únicamente en la NOM-CCA-014-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria textil se menciona que, en caso de identificar alguna descarga que a pesar del cumplimiento de la NOM cause algún efecto negativo en el cuerpo receptor, se podrán establecer límites máximos permisibles -de considerarse necesario- para el color.

Por otro lado, la Ley Federal de Control de Contaminación del Agua, comúnmente conocida como Ley de Aguas Limpias (CWA por sus siglas en inglés), establece la regulación de los vertidos de contaminantes en las aguas de Estados Unidos; al igual que la regulación de las normas de calidad de las aguas residuales. Además, se han puesto en marcha programas para controlar la contaminación a través de normas que regulen las aguas residuales provenientes de la industria, entre otros (EPA, 2020). A pesar de lo anterior, no se han establecido límites máximos permisibles para la presencia de colorantes en aguas residuales o cuerpos de agua receptores. Asimismo, todos los estados han adoptado criterios narrativos de calidad del agua a fin de complementar los criterios numéricos. Dichos criterios se encargan de describir la calidad del agua deseada para un cuerpo de agua. Los criterios narrativos pueden indicar, por ejemplo, si los vertidos están libres de color,

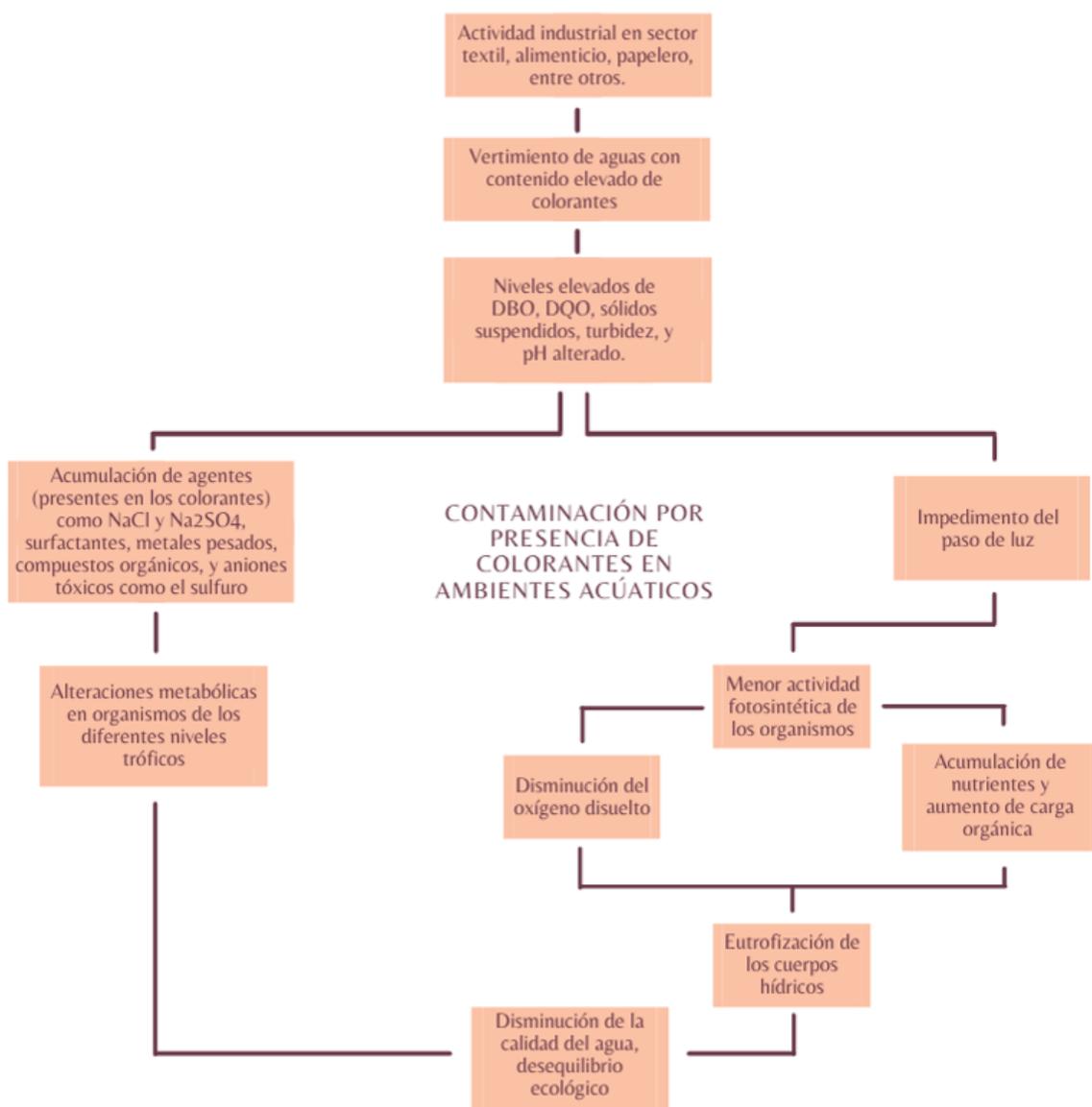


Figura 1: Efectos por contaminación de colorantes en ambientes acuáticos. Elaboración propia basado en Bráñez, 2018; Maldonado & Molina, 2011; Cortazar et al. 2014; Tkaczyk et al. 2020; Aristizábal y Bermúdez, 2007.

olor, sabor y turbidez. (NPDES, 2010).

(Corrales y Caycedo 2020).

Composición de los colorantes

La composición general de los colorantes consiste un grupo cromóforo y auxocromos. El primero es el responsable de la absorción de la luz y por lo tanto le da color a la molécula; los segundos representan al grupo funcional que le dan afinidad a la molécula hacia fibras y tejidos y amplían la longitud de onda a la que se absorbe el color, brindándole una mayor intensidad visual. Finalmente, los colorantes suelen tener un solubilizador, que por la presencia de iones le da afinidad al colorante con diversos solventes (Marcano, 2018).

Algunos ejemplos de grupos cromóforos son: N=O (nitroso), O-N=O (nitro), C=S (tiocarbonilo), C=O, (carbonilo), N=N (azo), N=N-O (azoxi), C=N (ciano), C=N (imino), C=C (etinilo). Entre los auxocromos, algunos ejemplos son: OH (hidroxi), NHMe (metilamino), NMe2 (dimetilamino), OR (alcoxi), Cl, Br, I, (halógenos) (Marcano, 2018).

Existen diversas formas de clasificar a los colorantes, una de ellas es de acuerdo con el grupo químico que los caracteriza (Tabla 1).

Debido a que los auxocromos influyen en la longitud de absorción del cromóforo: si la tendencia es hacia las longitudes de onda mayores, se habla de un desplazamiento batocrómico, por el contrario, si la absorción se da hacia las longitudes de onda menores se trata de un desplazamiento hipsocrómico

Contaminación de agua con colorantes

De acuerdo a la Conferencia de la ONU sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD, 2019), la industria textil es la segunda más contaminante a nivel mundial, trayendo consigo múltiples impactos ambientales negativos como:

Tabla 1. Clasificación de los colorantes según su grupo químico

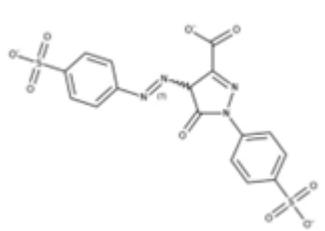
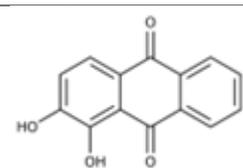
Clasificación Química	Características	Ejemplo
Azoicos	Son todos aquellos que poseen al menos un grupo R-N = N-R'. Estos son los colorantes más utilizados en el sector textil.	 <p>Tartrazina, coloración naranja</p>
Antraquinonas	Suelen tener uno o más grupos hidroxilo. La mayoría de los colorantes naturales pertenecen a esta clasificación.	 <p>Alirazina, coloración roja</p>

Tabla 1. Clasificación de los colorantes según su grupo químico

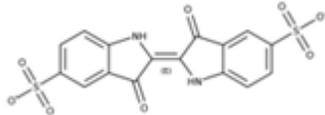
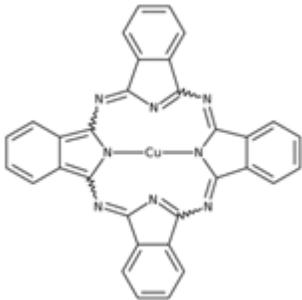
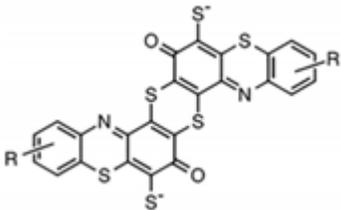
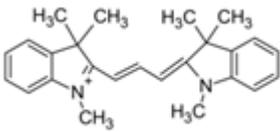
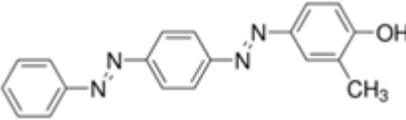
Clasificación Química	Características	Ejemplo
Ion arilcarbonio	<p>Los colorantes que pertenecen a esta clasificación tienen al menos un átomo de carbono cargado positivamente. A este grupo pertenece el colorante índigo, que es de los más antiguos que se conocen.</p>	 <p>Carmín de Índigo, coloración azul</p>
Ftalocianina	<p>En su estructura poseen dos anillos fusionados (benceno y piridina). La ftalocianina es una molécula muy versátil, pues debido a su conformación estructural puede coordinar hasta 70 elementos en forma de iones metálicos o iones de hidrógeno, pero únicamente da coloraciones verdes y azules.</p>	 <p>Ftalocianina de cobre (II), coloración azul</p>
Sulfuro	<p>Son complejos poliméricos con azufre en su estructura, y para el proceso de teñido es necesario adicionar agentes reductores, lo que los hace altamente contaminantes. Los colorantes sulfurosos suelen dar lugar a tonos opacos como rojos, negros y cafés.</p>	 <p>Negro sulfuro 1, coloración negra</p>

Tabla 1. Clasificación de los colorantes según su grupo químico

Clasificación Química	Características	Ejemplo
Polimetino	Los colorantes de polimetina se caracterizan por tener una estructura lineal en cuyos extremos se encuentra un grupo donador y un sustractor de electrones. Uno de sus usos es en el área clínica, pues estos funcionan como marcadores fluorescentes de biomoléculas.	 <p>Astrafloxina, coloración roja</p>
Nitro	Son aquellos que poseen un nitrógeno ligado a dos oxígenos, - NO ₂ . Principalmente dan tonalidades amarillas.	 <p>Amarillo disperso 7</p>

Elaboración propia con información de Saura y Galindo, 2015; Gibaja y Salaverry, 1998; Pérez-Folch et al. 2006. Figuras obtenidas de Gaviria-Arroyave et al. 2018; Marcano, 2018.

- Alto consumo del recurso hídrico (93.000 millones de metros cúbicos de agua anualmente).
- Desperdicio de un 20 % del agua total a nivel mundial.
- Emisión del 10 % de los gases globales de efecto invernadero (850 toneladas/año).
- Producción del 20 % de aguas residuales mundiales contaminadas principalmente con colorantes.
- Generación de medio millón de toneladas de microplásticos anuales en el proceso de lavado de textiles.

Existe una amplia variedad de sectores que emplean colorantes en sus procesos,

por lo tanto, es muy común que estas sustancias se encuentren presentes en los efluentes que son liberados al medio ambiente por dichas industrias, que van desde la textil, la industria papelera, de curtiduría, la cosmetológica, farmacéutica, alimenticia, la industria de la medicina y la medicina veterinaria entre otras (Tkaczyk et al, 2020). Por presentar un ejemplo, se estima que aproximadamente de 105,000 a 280,000 toneladas de colorantes textiles se pierden cada año en la industria textil y se descargan directamente en ambientes acuáticos (Maas y Chaudhari, 2005).

Caracterización y detección de colorantes en México

Río Zahuapan, Tlaxcala.

Por medio de un estudio llevado a cabo en

el Río Zahuapan, considerado la principal corriente hidrológica en el estado de Tlaxcala, fue posible identificar los problemas de contaminación originados por los desechos vertidos al Sistema hidrológico Atoyac-Zahuapan, provenientes de distintas actividades industriales. En el afluente de Atenco las industrias conurbadas se dedican al reciclaje de papel. Dentro de sus principales desechos se encuentran: celulosa, grasas, aceites y colorantes. Mientras que en la Confluencia Apizaquito-Atenco, se encontraron colorantes, hidróxido de sodio, grasas y aceites. Por otro lado, en el Arroyo Atlixnac, las industrias descargan celulosa y sales originadas de colorantes y ácido sulfónico. La contaminación de estos cuerpos de agua ocasiona serios problemas a la salud pública y a los ecosistemas acuáticos por las grandes cantidades de materiales tóxicos que han sido liberados a las aguas superficiales (Jiménez -Guillén y Hernández-Rodríguez, 2011).

Río Atoyac, Puebla-Tlaxcala

A lo largo de las comunidades de San Martín Texmelucan, Puebla y Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala; se han establecido fábricas textiles productoras de tela de mezclilla para la confección de jeans (Denim), las cuales generan grandes cantidades de agua residual con distintos contaminantes como los colorantes que, en la mayoría de los casos, son vertidas sin un tratamiento adecuado (Figura 2). Estos efluentes son generalmente alcalinos, calientes y están altamente coloreados, contribuyendo enormemente a la contaminación y deterioro del agua del río. La carga contaminante y la toxicidad de los efluentes textiles es dos a tres veces mayor que el agua residual urbana. Se determinó que la cantidad de colorante índigo en el agua residual es de 34.9 mg/L. Además de tener grandes concentraciones de este colorante, existen otros parámetros que se encuentran fuera de los límites máximos permisibles indicando el



Figura 2. Contaminación del Río Atoyac por producción de mezclilla. Recuperado de (Olguín y Rojas, 2017).

estado crítico en el que el Río Atoyac se encuentra actualmente (Estrada-Rivera, 2018).

Toxicología ambiental de los colorantes

En cuanto a la evaluación de riesgo toxicológico por presencia de colorantes en ambientes acuáticos es necesario considerar los diferentes niveles tróficos de los organismos en el sitio afectado, por lo tanto se deben hacer pruebas en algas, plantas, invertebrados y vertebrados, además de microorganismos como bacterias y protistas, esto con el fin de determinar qué organismos son más susceptibles a la exposición de los distintos grupos químicos en los que se clasifican los colorantes.

A partir de ensayos toxicológicos llevados a cabo por diferentes autores en organismos situados en distintos niveles de la red trófica, algunos de los efectos observados en ambientes acuáticos contaminados con colorantes se muestran en la Tabla 2.

Biorremediación de colorantes con hongos

Los hongos ligninolíticos mejor conocidos como hongos de la podredumbre blanca, se han popularizado por su potencial para degradar compuestos recalcitrantes como los hidrocarburos poliaromáticos, explosivos, plaguicidas, tintes, entre otros. Esto se debe principalmente a que poseen un complejo de enzimas oxidativas extracelulares que, en condiciones naturales, tienen la función de degradar la lignina de los organismos vegetales (Cardona et al, 2009). Los colorantes son comúnmente clasificados como compuestos recalcitrantes ya que estos no son biodegradables y tienden a acumularse en los organismos vivos causando enferme-

Tabla 2. Toxicología ambiental de colorantes azoicos probados en distintos organismos.

Tipo de organismo	Efectos toxicológicos reportados
Protistas ciliados	Inhibición del crecimiento, deformación celular, disminución en la capacidad de ingestión
Protistas (Algas)	Disminución del peso seco y del tamaño celular, bioacumulación celular
Invertebrados (crustáceos)	Aumento de actividad enzimática
Vertebrados (peces)	Daño en las branquias e insuficiencia renal
Vertebrados (peces)	Deposición del colorante en las branquias y línea lateral, aparición de manchas negras o cafés en el cerebro

Modificado de Tkaczyk et al. 2020.

dades y trastornos (Zaruma-Arias, et al, 2018).

Dentro de las enzimas extracelulares se incluyen la Lignino Peroxidasa, Manganeso Peroxidasa, Lacasas y Oxidasas, las cuales a través de diferentes rutas metabólicas son responsables de la degradación de la lignina y algunos compuestos similares (Rojas-Verde, 2010). Debido al gran potencial de degradación de compuestos recalcitrantes por parte de los hongos de podredumbre blanca, existe un amplio interés por implementar técnicas de biorremediación mediante el uso de tecnologías enzimáticas (Whiteley y Lee, 2006).

Por lo anterior, se han realizado múltiples investigaciones con las que se han determinado las especies de hongos más eficaces para la degradación de colorantes en el tratamiento biológico (Tabla 3).

Tabla 3. Especies de hongos de la podredumbre blanca utilizadas para la degradación de colorantes.

Especie	Mecanismo de acción
<i>Bjerkandera adusta</i>	Manganeso Peroxidasa
<i>Cyathus bulleri</i>	Lacasa
<i>Funalia trogii</i>	Adsorción, biodegradación
<i>Lentinula edodes</i>	Lacasa
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Lignino Peroxidasa
<i>Phlebia radiata</i>	Peroxidasa
<i>Pleurotus ostreatus</i>	Peroxidasa
<i>Pycnoporus cinnabarinus</i>	Lacasa
<i>Trametes versicolor</i>	Biosorción, ligninasa
<i>Trametes hispida</i>	Lacasa

Modificado de Rojas-Verde, 2010.

Algunas de las especies que pueden emplearse para la biorremediación de agua contaminada con colorantes se muestran en la Figura 3.

En los últimos años se ha puesto de manifiesto el interés en aplicar técnicas sustentables con la finalidad de que los

procesos de producción sean cada vez más limpios. Los principales tratamientos biológicos efectivos para la decoloración y degradación de colorantes en aguas residuales industriales son la biosorción, biorremediación y biodegradación.

En la biosorción, las moléculas del colorante se unen a la biomasa, mientras que en el proceso de la biodegradación las enzimas transforman las moléculas tóxicas de los colorantes a compuestos simples y menos tóxicos (Ruíz et al, 2018).

En el caso de los hongos, las paredes celulares fúngicas contienen gran cantidad de polisacáridos y proteínas. Estos biopolímeros ofrecen grupos funcionales como carboxilos, hidroxilos, sulfatos, fosfatos y grupos amino, los cuales pueden unirse a otros iones (Cabrera, et al. 2016). Lo anterior les confiere una capacidad única a los hongos para capturar los grupos cromóforos de los colorantes y los metales pesados presentes en algunas de estas estructuras.

Por otro lado, los hongos utilizan el oxígeno molecular como aceptor final de electrones, y la vía metabólica que utilizan para producir su energía interna es a partir de la glucólisis en el citoplasma y ciclo de Krebs en la mitocondria (Kirk y Cullen, 1998).

En la Tabla 4 se mencionan algunos antecedentes de biorremediación de cuerpos de agua contaminados con colorantes empleando distintas especies de hongos ligninolíticos realizados por distintos autores.

Enzimas ligninolíticas en el proceso de biorremediación de colorantes Como se



Figura 3. *Phlebia radiata* (a), *Pleurotus ostreatus* (b), *Trametes versicolor* (c), *Lentinula edodes* (d). Recuperadas de Gelpi, 2016a, 2016b, 2016c y Dechaume, 2002.

Tabla 4. Casos de biorremediación de aguas contaminadas con colorantes utilizando hongos ligninolíticos.

Organismo empleado para biorremediación	Sustancia contaminante	Enzima	Tiempo de aplicación/ remoción del colorante	Eficiencia del tratamiento	Referencia
<i>Phanerochaete sordida</i>	Rojo 120	Manganeso peroxidasa	7 días	90.6 %	Harazono et al., 2003.
<i>Trametes villosa</i> y <i>Trametes versicolor</i>	Colorante Triactive Navy PN2R (colorante catiónico con polisulfito de sodio)	-	1 hora	20 %	Cabrera et al. 2016
<i>Pleurotus ostreatus</i> (Jacq. ex Fr) Kumm	Azul turquesa	Lignino Peroxidasa	20 días	76,93 a 100 mg/L, 69,25 a 200 mg/L y 84,76 % a 400 mg/L	Ruíz et al., 2018.
<i>Pleurotus ostreatus</i>	Colorantes azoicos (colorantes derivados de hidrocarburos empleados en la industria textil)	Lacasa	14 días	94.4 %	Vallejo-Aguilar, 2021.

mencionó anteriormente, los hongos de la podredumbre blanca son considerados los organismos más eficientes al mineralizar en su totalidad la lignina, y las mismas enzimas que les proveen dicha capacidad, también pueden degradar sustancias recalcitrantes como son los colorantes. En la Figura 4 se muestran la estructura de las enzimas ligninolíticas y a continuación se mencionan algunas de sus características:

- Lignino peroxidasa (LiP)

Esta enzima oxidoreductasa se distingue de otras enzimas por su pH bajo y su alto potencial redox, lo cual le permite oxidar compuestos no fenólicos. Emplea peróxido de hidrógeno (H_2O_2) para oxidar compuestos orgánicos e inorgánicos (Rojas-Verde, 2010; Castillo, 2010; Bloding, 1998).

- Manganeso peroxidasa (MnP)

Se caracteriza por ser la segunda enzima peroxidasa mayormente producida por los hongos ligninolíticos. Su principal sustrato son los ácidos orgánicos tales como el oxalato, lactato y malonato, por lo tanto, es más específica que la LiP. Es una enzima ligninolítica extracelular que oxida Mn^{+2} hasta la especie oxidante Mn^{+3} por medio del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como oxidante (Rojas-Verde, 2010; Dávila y Vázquez-Duhalt, 2006).

- Peroxidasa versátil (VP)

Se encarga de conjugar las propiedades catalíticas de las dos enzimas anteriormente mencionadas, es decir; LiP y MnP, pues combina ambos ciclos dependiendo del sustrato a degradar. Posee gran afinidad hacia los colorantes (Dávila y Vázquez-Duhalt, 2006).

- Lacasa

Enzima perteneciente a la familia de las

polifenol oxidasas, por esta razón pueden oxidar un sustrato fenólico y a su vez iniciar una reacción de polimerización. De igual forma pueden oxidar compuestos orgánicos e inorgánicos. Su potencial redox es bajo, sin embargo, logran degradar compuestos recalcitrantes, como los colorantes, a través de mediadores redox (Castillo, 2010).

Dichas enzimas pueden actuar en conjunto o separadas, en función de las facultades del hongo ligninolítico para producir una o más de estas sustancias (Dávila y Vázquez-Duhalt, 2006).

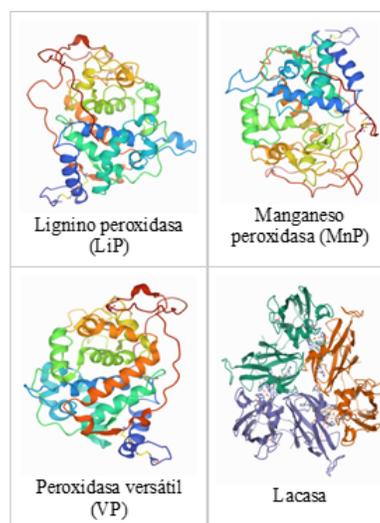


Figura 4. Estructura enzimas ligninolíticas utilizadas para la degradación de colorantes.

Recuperadas de RCSB, 2021.

Mecanismos de degradación de colorantes por hongos

Para comprender cuál es el papel que desempeñan las enzimas fúngicas en el proceso de degradación de colorantes, pueden revisarse las Figuras 5 y 6, en las que, respectivamente, se muestran los me-

canismos de reacción de la biodegradación del colorante violeta 5, y de un colorante derivado de la ftalocianina, ambos a través de la ruta enzimática de la peroxidasa versátil.

Alternativas para aplicación en campo

Se tiene algunos registros de que, a partir del año 2000, ya había interés por parte de algunos investigadores en desarrollar procesos basados en la enzima lacasa por su gran potencial en la decoloración de colorantes sintéticos. Una de las aplicaciones es el tratamiento de efluentes textiles. La fuente de lacasa provenía de las siguientes especies: *Corioloropsis gallica*, *Gliocladium virens*, *Lentinula edodes*, *Panus tigrinus*, *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus sp*, *Pycnoporus coccineus*, *Rhus vernicifera*, *Trametes sp. strain AH28-2*, *Trametes versicolor* (Rodríguez y Toca, 2006).

Una de las alternativas de aplicación en campo es la biosorción, que consiste en la acumulación de sustancias químicas en biomasa, la cual puede utilizarse viva o muerta (Garzón, 2009). Los organismos fúngicos son aptos para llevar a cabo dicho proceso debido al alto contenido de proteínas y polisacáridos presentes en sus estructuras, y por los grupos carboxilos, hidroxilo, sulfato, fosfato y aminos, que a su vez pueden unirse a los iones presentes en las sustancias que se desean remover, en este caso los colorantes (Bayramoglu y Arica, 2006).

Conclusiones

Actualmente la ciencia está buscando alternativas para remediar la contaminación en suelo, agua y atmósfera, utilizando métodos más amigables con el medio ambiente a tra-

vés de la biotecnología: la biorremediación con hongos ligninolíticos es una opción altamente viable por su potencial para degradar colorantes presentes en efluentes provenientes de la industria. La capacidad degradadora varía de acuerdo con la especie de hongo utilizada, sin embargo, en distintos estudios se ha demostrado que la concentración de colorantes en agua una vez aplicado el tratamiento con las especies conocidas, es mucho menor a su concentración inicial.

Por otro lado, es fundamental realizar reformas a la legislación ambiental en México y en otros países. Se deben incorporar las regulaciones correspondientes sobre los límites máximos permisibles de colorantes en ambientes acuáticos, fundamentados en estudios e investigaciones que demuestren el riesgo potencial de todos aquellos factores que afectan la salud de los ecosistemas acuáticos, así como los requerimientos de calidad de agua establecidos.

Finalmente es necesario recalcar la importancia de atender las regiones de emergencia ambiental derivadas de la contaminación de agua con colorantes, pues al ser sustancias poco reguladas, los cuerpos hidrológicos afectados por estas no suelen recibir la atención pertinente.

Referencias

Aristizábal, A. y Bermúdez, C., 2007. Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reuso. Facultad de ingeniería química de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Disponible en <https://docplayer.es/28510680-Estudio-de-la-factibilidad-de-un-sistema-de-electrocoagulation-para-tratamiento->

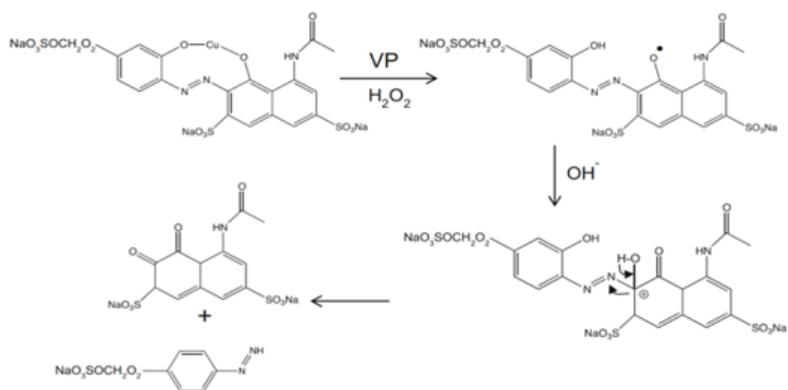


Figura 5. Mecanismo de degradación del colorante azoico violeta 5, por *Bjerkandera adusta* a través de la ruta enzimática con Peroxidasa Versátil (VP). Obtenido de Baratto et al, 2015.

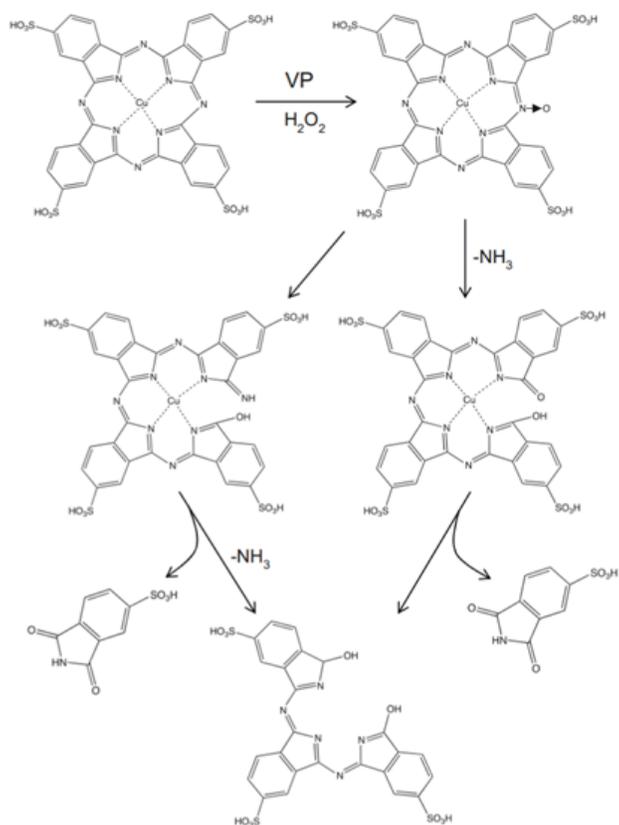


Figura 6. Mecanismo de degradación de colorante derivado de la ftalocianina, por *Bjerkandera adusta* a través de la ruta enzimática con Peroxidasa Versátil (VP). Obtenido de Baratto et al, 2015.

de-aguas-procedentes-de-lavanderias-industriales-con-fines-de-reuso.html Consultado el 15 de julio de 2021.

Baratto, M.C., et al, 2015. EPR and LC-MS studies on the mechanism of industrial dye decolorization by versatile peroxidase from *Bjerkandera adusta*. National Center for Biotechnology Information, United States. Disponible en <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25567062> Consultado el 29 de julio de 2021.

Barrios-Ziolo, L. F., Gaviria-Restrepo, L. F., Agudelo, E. A. y Cardona-Gallo, S. A. Estudio de la toxicidad asociada al vertimiento de aguas residuales con presencia de colorantes y pigmentos en el área metropolitana del Valle de Aburrá, Rev. EIA, 13 [26], pp. 61-74, 2016.

Bayramoglu, G., y Arica, Y. Biosorption of benzidine based textile dyes "Direct Blue 1 and Direct Red 128" using native and heat treated biomass of *Trametes versicolor*, J. Hazard. Mater., 143, pp. 135-143, 2006.

Bloding, W., Doyle, W. A., Smith, A. T., Winterhalter, K., Choinowski, T. y Piontek, K. Autocatalytic formation of a hydroxy group at C₆ of Trp171 in lignin peroxidase, Biochemistry, 37 [25], pp. 8832-8838, 1998.

Bráñez S. M. 2018. Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil. Universidad de San Martín de Porres, Perú. Disponible en: <https://www.aulavirtualusmp.pe/ojs/index.php/rc/article/view/1369/1519> Consultado el 8 de julio de 2021.

Cabrera, I. et al, 2016. Evaluation of the adsorption capacity of the fungi *trametes villosa* residual from the

removal process of the dye triactive navy pn2r. Scielo. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612016000300001 Consultado el 28 de julio de 2021.

Cardona, M., Osorio, J. y Quintero, J. Degradación de colorantes industriales con hongos ligninolíticos. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, 48, pp. 27-37, 2009.

Castillo, A. G. M. 2010. Aislamiento de hongos lignocelulolíticos a partir de residuos agroindustriales de plátano. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C. Disponible en: <https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/637> Consultado el 6 de julio de 2021.

Corrales. R. L. C. y Caycedo L. L. 2020. Principios fisicoquímicos de los colorantes utilizados en microbiología. Universidad Colegio mayor de Cundinamarca. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/342729051_Principios_fisicoquimicos_de_los_colorantes_utilizados_en_microbiologia_Principios_fisicoquimicos_de_los_colorantes Consultado el 26 de junio de 2021.

Cortazar, M. A., Coronel, O. C., Escalante, L., A. y González, R. C. 2014. Contaminación generada por colorantes de la industria textil. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. Disponible en: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html> Consultado el 22 de mayo de 2021.

Dávila, G. y Vázquez-Duhalt, R. Enzimas ligninolíticas fúngicas para fines ambientales. Mensaje Bioquímico, 30, pp. 29-55, 2006.

- Dechaume, J. P. 2002. *Lentinus edodes*. Asociación cultural "Baxauri" Kultur el-kartea. Mikologia. Bajauri. Disponible en: <http://www.fichasmicologicas.com/?micos=1&alf=1&art=335> Consultado el 2 de agosto de 2021.
- EPA. Summary of the Clean Water Act. 2020. Disponible en: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-water-act> Consultado el 7 de julio de 2021.
- Estrada-Rivera, A. 2018. Evaluación toxicológica del agua residual textil (proceso denim) vertida al Río Atoyac. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/7620> Consultado el 29 de junio de 2021.
- Garzón, J. R. C. 2009. Cinética de degradación de colorantes textiles de diferentes clases químicas por hongos y bacterias inmovilizados sobre fibra de Agave tequilana Webber var. Azul. Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8222/tesis217.pdf?sequence=1> Consultado el 23 de junio de 2021.
- Gaviria-Arroyave, M., Osorio-Echavarría, J. y Gómez-Vanegas, N. 2018. Evaluación del escalamiento de un reactor para el tratamiento de efluentes textiles usando *Bjerkandera sp.* Colombia. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302018000300080 Consultado el 25 de julio de 2021.
- Gelpi, C. 2016a. *Phlebia radiata*. Sociedad Micológica Extremeña. Disponible en: <https://micoex.org/2016/09/17/phlebia-radiata/> Consultado el 2 de agosto de 2021.
- Gelpi, C. 2016b. *Pleurotus ostreatus*. Sociedad Micológica Extremeña. Disponible en: <https://micoex.org/2016/09/17/pleurotus-ostreatus/> Consultado el 2 de agosto de 2021.
- Gelpi, C. 2016c. *Trametes versicolor*. Sociedad Micológica Extremeña. Disponible en: <https://micoex.org/2016/09/17/trametes-versicolor/> Consultado el 2 de agosto de 2021.
- Gibaja, O. S. y Salaverry, G. O. Pigmentos naturales quinónicos. UNMSM, Fondo Editorial. 277 p, 1998.
- Harazono, K., Watanabe, Y. y Nakamura, K. Decolorization of azo dye by the white-rot basidiomycete *Phanerochaete sordida* and by its manganese peroxidase. J. Biosci. Bioeng., 95 [5], pp. 455-459, 2003.
- Hernández-Ruíz, G. M., Álvarez-Orozco, N. A. y Ríos-Ororio, L. A. Biorremediación de organofosforados por hongos y bacterias en suelos agrícolas: revisión sistemática. Corpo. Cienc. Tecnol. Agropecuaria, 18 [1], pp. 139-159, 2017.
- Jiménez-Guillén, R. y Hernández-Rodríguez, M. Zahuapan: río-región-contaminación. El Colegio de Tlaxcala, A. C, México, pp. 29-100, 2011.
- Kirk, T.K., y Cullen, D., Enzymology and molecular genetics of wood degradation by white-rot fungi., Environmentally Friendly Technologies for the Pulp and Paper Industry, pp. 273-301,1998.
- Maas, R. y Chaudhari, S. Adsorption and

- biological decolourization of azo dye Reactive Red 2 in semicontinuous anaerobic reactors, *Process Biochem.*, 40 [2], pp. 699-705, 2005.
- Maldonado, R. A. y Molina, A. R. 2011. Estudio para la reducción de colorantes de las aguas residuales de la industria textil a través de procesos electroquímicos. Facultad de Ciencias agropecuarias y ambientales de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Ecuador. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1508/13/UPS-CT002191.pdf> Consultado el 8 de julio de 2021.
- Marcano, D. 2018. Introducción a la química de los colorantes. Colección Divulgación Científica y Tecnológica. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas, Venezuela. 254 p, 2018. <http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/19390/1/colorantes%20listo%20%2Bisbn.pdf>
- Moeller, G.E. y Garzón, M.A. Desarrollo de Tecnologías no Convencionales para el Tratamiento de Efluentes de la Fabricación de Colorantes del tipo Azo, *Anuario Imta.* 23, pp. 123-129, 2003.
- Mohammad, A., Al-Ghouti, J. Li., Yousef, S. N., Al-Laqtah, G. W. y Mohammad N. M. A. Adsorption mechanisms of removing heavy metals and dyes from aqueous solution using date pits solid adsorbent. *Journal of Hazardous Materials* 176, pp. 510-520, 2010.
- Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-014-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria textil. Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4794015&fecha=18/10/1993 Consultado el 6 de junio de 2021.
- NPDES, 2010. CHAPTER 6. Water Quality-Based Effluent Limitations. National Pollutant Discharge Elimination System Permit Writers' Manual. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/pwm_chapt_06.pdf Consultado el 8 de julio de 2021.
- Olguín, M. y Rojas, D. 2017. La producción de mezclilla contamina el río Atoyac. UNAM Global. Disponible en: <https://unamglobal.unam.mx/la-produccion-de-mezclilla-contamina-el-rio-atoyac/> Consultado el 29 de junio de 2021.
- Pérez-Folch, J. et al, 2006. Reducción electroquímica de colorantes sulfurosos. Vías de proceso. Universitat Politècnica de Catalunya, España. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/4693/7/reducci%F3n%20electroqu%EDmica.pdf;jsessionid=23A7051A80ADFE472377D6AD8F1729D4?sequence=1> Consultado el 24 de junio de 2021.
- RCSB, 2021. Protein Data Bank. Disponible en: <https://www.rcsb.org/> Consultado el 20 junio de 2021.
- Rodríguez, C. S. y Toca, H. J. L. Industrial and biotechnological applications of laccases: A review, *Biotechnol. Adv.*, 24, pp. 500-513, 2006.
- Rojas-Verde, M. G. 2010. Producción de enzimas lignolíticas por hongos de pudrición blanca aislados en Nuevo León. Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Disponible en:

<http://eprints.uanl.mx/2244/1/1080190928.pdf> Consultado el 7 de junio de 2021.

Ruíz, L., Iannacone, J., Tocto, I., Ruíz, A. y Harirchian, P. Acción de *Pleurotus ostreatus* (JACQ. EX FR) Kumm en la remoción del colorante azul turquesa en biorreactores airlift. *The Biologist* (Lima), 16 [2], pp. 221-235, 2018.

tamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión Textil e Industrial. *Rev. Facultad de Ciencias Químicas*, [18], 2018.

Saura, A. y Galindo, F. Utilización del colorante índigo en el laboratorio docente de Química Orgánica, *Educación Química*, 27 [2], pp. 133-138, 2015.

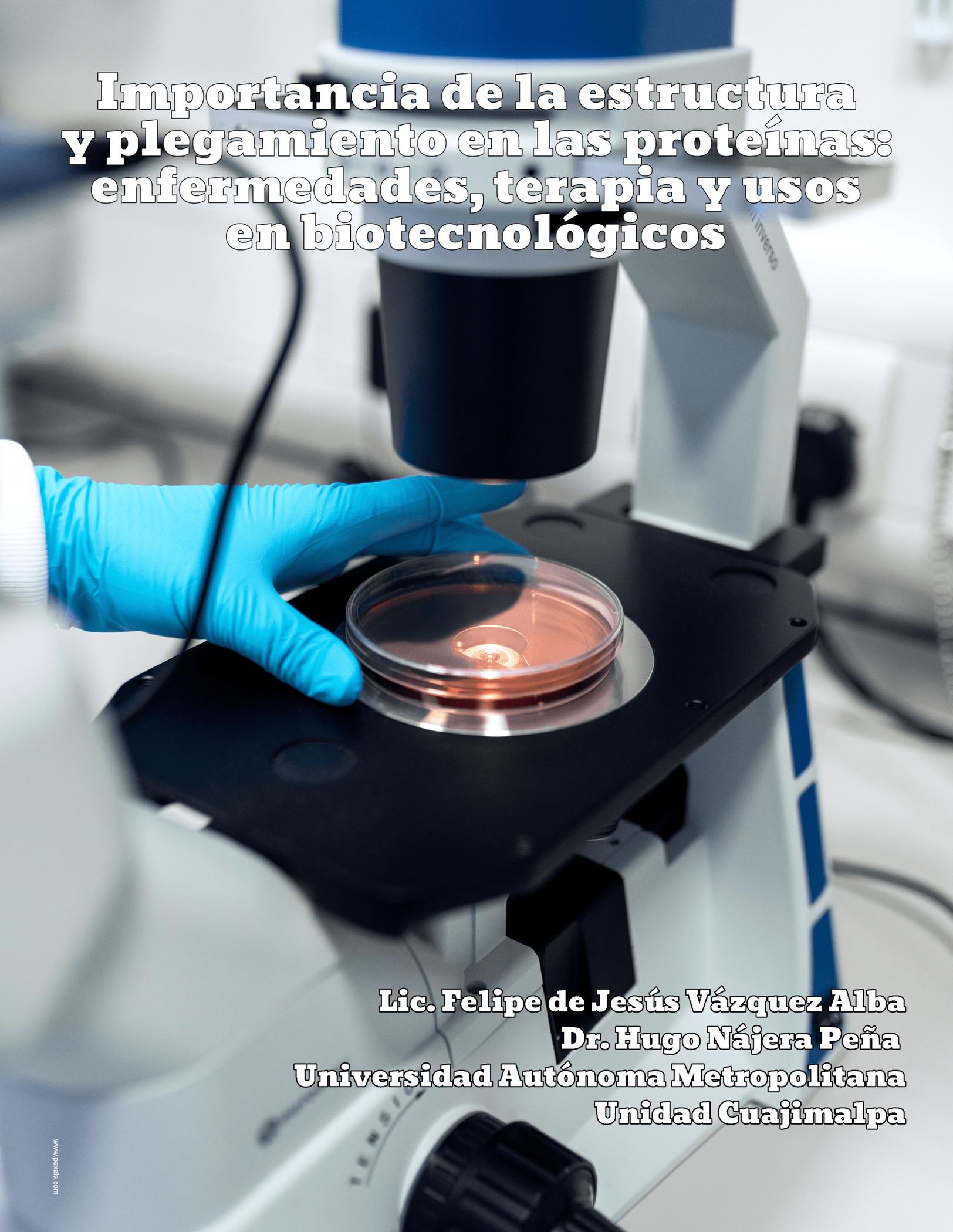
Tkaczyk, A., Mitrowska, K. y Posyniak, A. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review, *Sci. Total Environ.*, 717, 2020.

UNCTAD, 2019. El costo ambiental de estar a la moda. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2019/04/1454161> Consultado el 3 de junio de 2021.

Vallejo-Aguilar, M. L. A. 2021. Utilización de Lacasa de *Pleurotus ostreatus* y su biomasa residual para la degradación de colorantes azoicos y la remoción de metales en aguas residuales. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/12695> Consultado el 30 de junio de 2021.

Whiteley, C.G., y Lee, J. Enzyme technology and biological remediation, *Enzyme Microb. Technol.*, 38, pp. 291-316, 2006.

Zaruma-Arias, P. E., Proal-Nájera, J. B., Chaires-Hernández, I. y Salas-Ayala, H. I. Los Colorantes Textiles Industriales y Tra-



Importancia de la estructura y plegamiento en las proteínas: enfermedades, terapia y usos en biotecnológicos

**Lic. Felipe de Jesús Vázquez Alba
Dr. Hugo Nájera Peña
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Cuajimalpa**

Abstract

Proteins are one of the most important biomolecules for life, due to are involved in a wide range of essential functions for all organisms, for example, it participate in the response of the immunological system, in metabolism reactions, as well as in the oxygen transport in the blood, among others. Hence, normally, the function of proteins is directly related to the native state, since in certain circumstances a protein can acquire a non-native structural states that have been associated with a long list of human illness called amyloidosis. Which are characterized by the presence of amyloid fibers, in some cases, this type of structure is essential for the regulation or activation of proteins, in this case they are known as functional amyloids. This work addresses the importance of protein folding and structure, procedures and tools used to study this phenomenon, conditions related to unconventional folding, as well as the therapeutic strategies for these conditions and the use of biotechnology to take advantage of these amyloid structures.

Keywords

Folding, structure, native state, amyloidosis.

Resumen

Las proteínas son una de las biomoléculas más importantes para cada una de las células que conforman a los organismos, pues se encuentran involucradas en un amplio rango de funciones esenciales de un organismo. Por mencionar algunos ejemplos, participan en la respuesta del sistema inmunológico, en reacciones del metabolismo, así como en el transporte de oxígeno en la sangre, entre otros. Para ello, normalmente, la función de las proteínas

se encuentra relacionada directamente con el estado nativo, ya que, en determinadas circunstancias, una proteína puede adquirir estados estructurales distintos al nativo que se han asociado con una gran lista de padecimientos en humanos, llamadas amiloidosis. Las cuales se caracterizan por la presencia de fibras amiloides, en algunos casos, este tipo de estructura es esencial para la regulación o activación de las proteínas, en este caso se les conoce como amiloides funcionales. En este trabajo se aborda la importancia del plegamiento y estructura de las proteínas, procedimientos y herramientas que se utilizan para estudiar este fenómeno, padecimientos relacionados a un plegamiento no convencional, así como las estrategias terapéuticas para dichos padecimientos y el aprovechamiento que le ha dado la biotecnología a las estructuras amiloides.

Palabras clave

Plegamiento, estructura, estado nativo, amiloidosis.

Composición y estructura

Las proteínas también consideradas como biopolímeros, son estructuras altamente complejas que se encuentran formadas por pequeños bloques o monómeros denominados aminoácidos o residuos (cuando se encuentran unidos entre sí). Existen veinte distintos aminoácidos que forman convencionalmente a las proteínas y comparten una estructura en general, se encuentran formados por un carbono central denominado carbono α (α), un grupo ácido carboxílico, un grupo amino, un átomo de hidrógeno y un grupo adicional llamado grupo R o cadena lateral. Este último es un grupo químico que varía en su estructura, tamaño, carga y solubilidad en el agua,

el cual es característico para cada uno de los aminoácidos, pues le confiere sus características físicoquímicas, es así como pueden clasificarse en distintos tipos, por ejemplo, en aminoácidos aromáticos, con carga positiva, negativa o neutra, así como su afinidad por las moléculas de agua, es decir, hidrofóbicos (repelen al agua) como los que contienen anillos aromáticos o hidrofílicos (con mayor afinidad al agua), como los que contienen grupos hidroxilo.

Las proteínas se encuentran formadas por la unión consecutiva de residuos llamada “secuencia de aminoácidos” (cadena polipeptídica) que está dada esencialmente por la información genética, la cual determina el orden, combinación y posición de los aminoácidos y determina la longitud de la secuencia (péptidos, polipéptidos y proteínas). La unión entre aminoácidos se lleva a cabo por un enlace químico del tipo amida o también considerado como enlace peptídico, que sucede entre el grupo carboxílico de un residuo y un grupo amino del siguiente. Sin embargo, la secuencia de aminoácidos solo es el inicio para que una proteína pueda alcanzar estructuras demasiado complejas y así adquirir su capacidad funcional, esto es posible a través de un intrincado fenómeno llamado “plegamiento” o *foldin* en inglés (analizado más adelante), pudiendo alcanzar una estructura tridimensional que le confiere una función biológica específica (en condiciones no patológicas), esta estructura o conformación es considerado como el “estado nativo”.

En proteínas existen cuatro estados o niveles de organización estructural que puede adquirir una cadena polipeptídica. Por ejemplo, el más sencillo de ellos es la “estructura primaria” o desnaturalizada,

que corresponde únicamente a la secuencia de aminoácidos (figura 1), en donde, el único tipo de enlaces o interacciones es el enlace peptídico que los une.

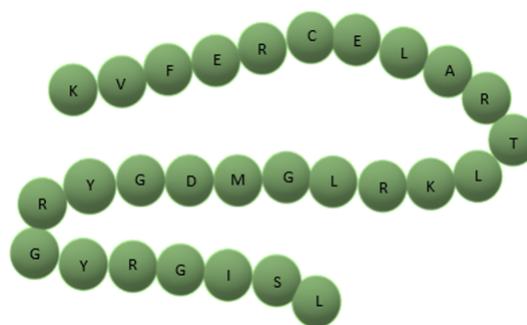


Figura 1. Estructura primaria en proteínas.

El siguiente nivel corresponde a la adquisición de una “estructura secundaria” (figura 2), en donde, los residuos de la secuencia adquieren un ordenamiento en el espacio con patrones repetitivos, que permiten formar principalmente dos tipos de estructura secundaria repetitiva, el primero de ellos corresponde a la formación de espirales o hélices α , que normalmente son representados gráficamente como cintas helicoidales, mostradas en la figura 2A, por otra parte, una conformación más alargada, corresponde a la formación de láminas β plegadas (debido a que el arreglo de los átomos del esqueleto de los residuos se encuentran en forma de zig-zag, confirmando dicho aspecto), este tipo de estructura secundaria es normalmente presentado como cintas en forma de flechas (figura 2B) y cuando se encuentran adyacentes entre sí pueden ser paralelas o antiparalelas (Nelson, 2019). En este nivel de organización, las principales interacciones que las estabilizan son una enorme cantidad de

interacciones débiles, del tipo puentes de hidrógeno, que se forman entre los grupos amino y carboxílicos de los aminoácidos, sin contemplar las cadenas laterales de los mismos.

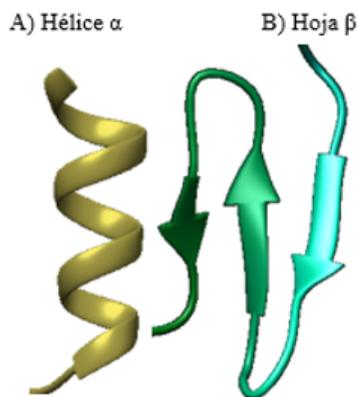


Figura 2. Tipos de estructura secundaria en proteínas.

Por otra parte, la combinación de estructuras secundarias del tipo hélices α y hojas β plegadas dan origen a un tercer nivel de organización estructural en proteínas, denominado “estructura terciaria” (figura 3). Como se puede observar en la figura 3, las estructuras tipo hélices α y hojas β plegadas, se encuentran unidas por un tipo de estructuras llamadas asas o *loops* que permiten la unión entre los dos tipos de estructura secundaria (Nelson, 2019). Para este nivel de organización estructural, participan todos los átomos de los aminoácidos, es decir, se incluyen las cadenas laterales, ya que permiten la formación de diferentes tipos de interacciones que estabilizan a las proteínas, entre ellas, podemos mencionar interacciones débiles, como los puentes de hidrógeno, fuerzas de van der Waals, interacciones electrostáticas o en contraparte interacciones fuertes,

del tipo covalente, como la formación de puentes disulfuro entre los átomos de azufre presentes en las cisteínas.

Por otra parte, algunas proteínas cuentan con un estado aún más complejo de organización, este corresponde a una “estructura cuaternaria” (figura 3B). En este nivel de organización participan más de una cadena polipeptídica que forman a las proteínas, estas son denominadas subunidades, las cuales pueden ser totalmente iguales o distintas (Nelson, 2019), un ejemplo de ello es la estructura de una proteína llamada trifosfato isomerasa presentada en la figura 4, una proteína fundamental en el metabolismo de los carbohidratos. En este nivel de organización participa el mismo tipo de interacciones presentes en las proteínas con estructura terciaria que estabilizan a las proteínas.

Plegamiento.

El cómo una cadena polipeptídica totalmente desordenada adquiere uno de los niveles de organización mencionados en la sección anterior, sucede como resultado del fenómeno de plegamiento. Este inicia desde que los ribosomas se encuentran sintetizando la cadena polipeptídica o una vez que se ha sintetizado totalmente, es decir, desde un estado desplegado (D), a partir de este punto la cadena polipeptídica pasa a través de una serie de intermediarios estructurales (I) hasta llegar al estado plegado o nativo (N), (Dobson, 2004), ¿suena un proceso relativamente sencillo, cierto?, sin embargo, este proceso es tan complejo que gran parte sigue siendo desconocido, por lo tanto, resulta complicado tratar de dilucidar completamente la ruta o mecanismo por el cual una sola proteína se pliega, debido a la gran diversidad y complejidad de

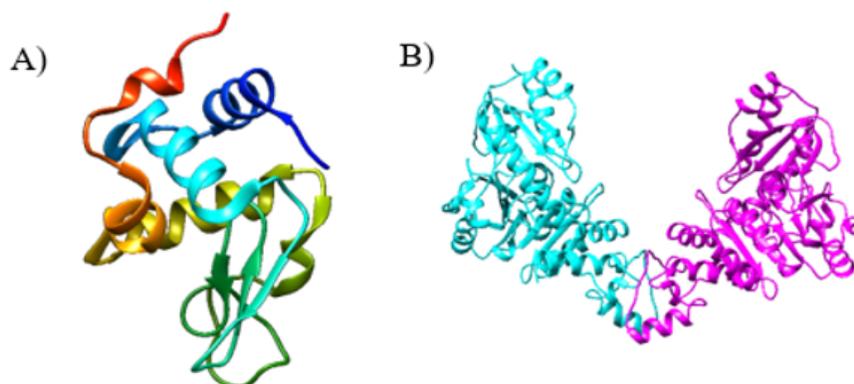


Figura 3. Estructura terciaria y cuaternaria en proteínas. Para representar la estructura tridimensional de las proteínas se muestra la estructura de la lisozima de clara de huevo de gallina (HEWL) con el identificador 7D0W en el *protein data bank* (PDB), panel A y la estructura de la triosafosfato isomerasa con el identificador 1CI1 en el PDB, para representar la estructura cuaternaria, panel B, la cual se encuentra formada por dos subunidades iguales.

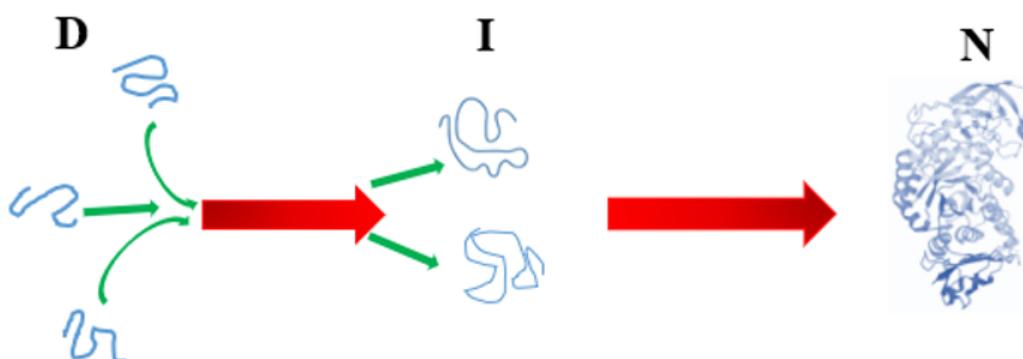


Figura 4. Representación general del plegamiento de proteínas.

las proteínas, es así que sigue siendo un reto para los investigadores interesados en este ámbito. Cuando se ha estudiado este fenómeno, se ha demostrado que el cambio de una conformación estructural a otra, implica una gran cantidad de parámetros, por mencionar algunos, se habla del aumento o disminución de interacciones entre los átomos de los aminoácidos, cuestiones termodinámicas, como cambios de energía y grados de desorden, así como las condiciones en las que se esté estudiando el plegamiento (Dobson, 2004). Para representar de la manera más general posible el concepto de plegamiento, en la figura 4 se esquematiza el estado D, como uno de los millones de conformaciones desordenadas en las que se puede encontrar una cadena polipeptídica recién sintetizada, pasando por algunos intermediarios (I) clave, con una organización mayor que promueven la adquisición de una conformación tridimensional estable, el estado nativo (N).

Plegamiento no convencional.

El plegamiento hacia el estado nativo permite que una proteína pueda adquirir su función biológica específica, sin embargo, esto ocurre en ausencia de alteraciones que perturben o alteren el mecanismo de plegamiento, es decir, que una cadena polipeptídica en ocasiones no alcanza su conformación nativa y por lo tanto presenta otro tipo de estados estructurales, a este fenómeno se le conoce como un plegamiento no convencional, del inglés *misfolding*. Para evitar la pérdida de la función de una proteína debido al plegamiento no convencional, la célula se ha encargado de desarrollar mecanismos que eviten estos percances, por ejemplo, se han desarrollado un grupo de proteínas llamadas chaperonas moleculares, que intervienen en la eficiencia

del plegamiento, es decir, que ayudan a la cadena polipeptídica a alcanzar el estado nativo. Asimismo, existen mecanismos encargados de sondear y marcar a las proteínas que cuenten con un mal plegamiento con diferentes moléculas, para dirigir las a mecanismos de degradación y reciclaje de la cadena polipeptídica (Chiti, 2017).

Formación de amiloides.

Cuando las cadenas polipeptídicas se encuentran en un estado no convencional, tienden a adquirir diferentes tipos de conformaciones o conjuntos estructurados. Por ejemplo, se ha demostrado que las cadenas polipeptídicas en conjunto con otras, tienen la capacidad de formar agregados estructurales, que pueden presentarse con un alto grado de orden como monómeros o desorden, como precipitados amorfos, e incluso conjuntos con estructuras parcialmente plegadas del tipo nativo. De igual manera, las cadenas polipeptídicas pueden adquirir una conformación muy peculiar y altamente ordenada, caracterizada por tener un alto porcentaje de estructura secundaria del tipo hoja β cruzada, que tienen expuestos sus residuos hidrofóbicos, lo cual hace que se formen un tipo de fibras insolubles, llamadas “fibras amiloides” (figura 5). La estructura general de las fibras amiloides se ha dilucidado con técnicas microscópicas sofisticadas, como la microscopía electrónica de fuerza atómica (por sus siglas en inglés, AFM), que han demostrado que las fibras amiloides están compuestas por una serie de cuatro hojas β (figura 5A) antiparalelas que dan origen a una especie de fibrillas inmaduras o protofibrillas, que, en conjuntos de cuatro, forman estructuras de mayor tamaño y grosor, denominadas fibras amiloides con tamaños de entre 6 y 12 nm (Chiti, 2017) (figura 5B).

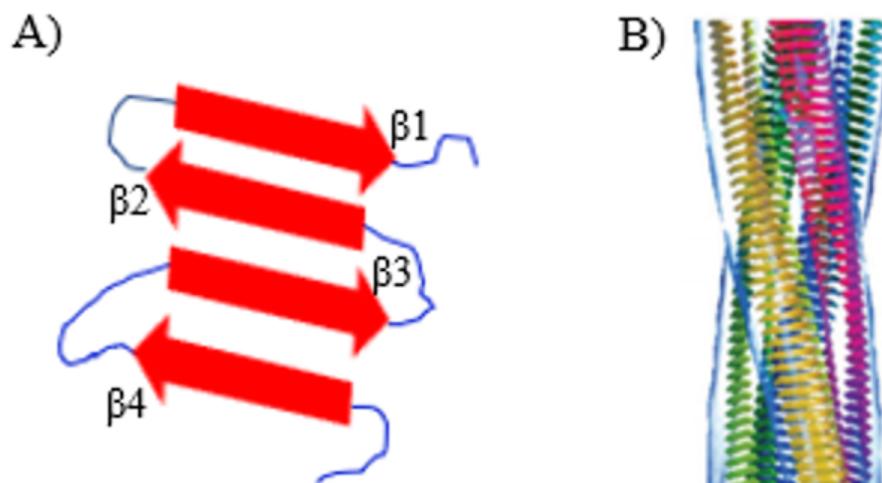


Figura 5. Estructura general de las fibras amiloides. A) conjunto de cuatro hojas β antiparalelas que dan origen a protofibrillas. B) Fibra amiloide madura que resalta en distintos colores las protofibrillas que la conforman. La figura del panel B fue modificada de: Chiti, 2017.

Efecto de los amiloides en humanos.

Entre las razones por las cuales existen alteraciones en el plegamiento de las proteínas, podemos resaltar dos cuestiones, una de ellas es la pérdida de la eficiencia y la capacidad de los mecanismos reguladores o de control para el plegamiento y degradación de las proteínas, los cuales se ven deteriorados principalmente en las etapas de la vejez en los humanos. Por otra parte, podemos mencionar alteraciones en la secuencia de aminoácidos, como las mutaciones en las que puede cambiar tan solo un aminoácido, suficiente para perturbar la conformación estructural de las proteínas. La alteración del plegamiento de las proteínas o plegamiento no convencional, en varios casos, contribuye a la pérdida de la función biológica de las proteínas (aunque no en todos) en un organismo, que, por lo tanto, tendrá efectos adversos, como conducir a la formación de agregados fibrilares, que, en conjunto

con más péptidos o proteínas, tienden a formar agregados o placas insolubles, que se acumulan en distintos órganos, como el cerebro, riñón, hígado y bazo. Estas son algunas de las razones por las que distintos investigadores se han centrado en el estudio de las enfermedades en humanos causadas por fibras amiloides, o también consideradas como amiloidosis (Dobson, 1999).

Actualmente, existe una lista creciente de más de 30 tipos de enfermedades en humanos que se asocian normalmente con una o más proteínas, de manera directa o indirecta, que se caracterizan por ser de distintos tipos, como las hereditarias, esporádicas o en algunos casos por agentes infecciosos y que, además, se presentan con mayor frecuencia en la vejez. Entre estas enfermedades podemos mencionar la enfermedad del Alzheimer, Parkinson, diabetes tipo II, enfermedad de Hunting-

ton, así como amiloidosis sistémicas, en donde los depósitos de agregados amiloides pueden incluso alcanzar el orden de los kilogramos (Dobson, 1999; Chiti, 2017). Por ejemplo, un par de enfermedades que han sido bien identificadas son la enfermedad de Gaucher, en la cual, una proteína llamada β -glucosidasa (proteína que degrada el lípido glucosilceramida, en los compartimientos llamados lisosomas en las células) se ve afectada por distintas mutaciones; esto genera una acumulación de glucosilceramida principalmente en los glóbulos blancos (un tipo de células del sistema inmune) y amiloidosis causadas por transtiretina, una proteína encargada de transportar a la hormona tiroxina y al retinol (conocido también como vitamina A), la cual se considera como una proteína amiloidogénica, lo que significa, que tiene la capacidad de formar fibras amiloides; se ha demostrado que las fibras amiloides se depositan en todo el cuerpo, incluyendo el sistema nervioso y el corazón, lo cual interviene en la función directa de los órganos involucrados (Valastyan, 2014).

Amiloides funcionales.

Cuando las proteínas adquieren estados estructurales como las fibras amiloides, no en todos los casos provocan o se asocian a diferentes padecimientos, debido a que, en distintas proteínas, el estado amiloide es fundamental para su función biológica, ya que se han descubierto diferentes péptidos y proteínas en humanos, así como en otros organismos, que necesitan de algunas proteínas en un estado amiloide o también llamados “amiloides funcionales”.

De acuerdo con el trabajo de Otzen, 2019, los amiloides funcionales pueden clasificarse en cinco grupos, de acuerdo con sus propiedades funcionales. En el grupo 1

se incluyen hormonas peptídicas, que cuando se encuentran en un estado amiloide, son almacenadas hasta su requerimiento; en el grupo 2 se encuentran las proteínas encargadas de funciones estructurales, como la formación de biopelículas en algunas bacterias; en el grupo 3 se encuentran proteínas relacionadas con información, en donde los amiloides participan en la memoria y herencia epigenética (se refiere a los cambios de activación/desactivación de genes, sin alterar la estructura del genoma); por otra parte, en el grupo 4 se asocian con la pérdida de la función biológica, esto se encuentra relacionado con que las proteínas globulares en el estado nativo son solubles, mientras que cuando su conformación cambia a un estado amiloide, se vuelven insolubles; finalmente en el grupo 5 se encuentran las proteínas relacionadas con la ganancia de función, es decir, que los péptidos o proteínas se activan cuando se encuentran en una conformación amiloide (Otzen, 2019). Cabe señalar que una proteína puede tener las características suficientes para pertenecer a uno o más de los grupos de amiloides funcionales mencionados anteriormente; además, con el paso del tiempo se han ido identificado una gran cantidad de amiloides que resultan potencialmente funcionales en distintos organismos.

Herramientas para estudiar los amiloides

Para entender la forma en la que ocurre el plegamiento en las proteínas, el cómo cambia una proteína de su estructura nativa a una estructura amiloide, los aminoácidos clave que participan en el plegamiento, así como los diferentes intermediarios que se forman durante este fenómeno, es necesario dilucidar este proceso, para

ello los científicos y grupos de investigación centrados en este ámbito, llevan a cabo una serie de diferentes estrategias para abordar estos problemas utilizando herramientas como las bioinformáticas o computacionales, estas permiten el estudio de las estructuras tridimensionales a través de visualizadores moleculares, también se pueden realizar alineamientos de secuencias y estructurales, además, existen predictores de la estructura tridimensional fundamentales cuando lo único que se conoce es la secuencia de aminoácidos, servidores que predicen regiones en la secuencia de aminoácidos que tienen una mayor probabilidad de formar fibras amiloides entre otros. En conjunto, se han desarrollado distintos procedimientos experimentales *in vitro* para comprender el plegamiento no convencional, entre ellos se encuentra el uso de diferentes condiciones o agentes químicos que perturban la estabilidad de las proteínas, desnaturalizándolas o llevándolas a conformaciones amiloides, entre las más usadas se encuentran: temperatura, pH, salinidad o agentes desnaturalizantes como la urea, cloruro de guanidina, etanol, etc. También resulta importante señalar el uso de proteínas modelo, ya que son fundamentales en este tipo de procedimientos, debido a que hasta cierto punto, facilitan y permiten comprender mejor el estudio del plegamiento en proteínas, en este caso, debido a que las proteínas modelo se caracterizan por ser bastante estudiadas y por lo tanto, cuentan con información de respaldo que ya se encuentra reportada, como las secuencias de aminoácidos, estructura tridimensional, condiciones en las que ya se han estudiado, etc. (Swaminathan, 2011).

Por otro lado, para poder darle seguimiento a los procedimientos experimentales, son necesarias técnicas de caracterización

molecular, que permiten obtener algún tipo de información en específico, a partir de las características y propiedades que tienen las fibras amiloides. Por ejemplo, para obtener información respecto a la estructura secundaria o terciaria se emplea una técnica llamada dicroísmo circular, la cual se basa en la diferencia de absorción de luz por parte de las proteínas, respecto al plegamiento de la cadena polipeptídica, se utilizan técnicas de fluorescencia (fenómeno en el que una molécula es excitada por la absorción de un tipo de luz), para ello se utilizan grupos químicos de los aminoácidos o moléculas adicionales que se añaden a las proteínas y cuentan con esta característica, por otra parte, para saber los estados estructurales de agregación, se pueden utilizar técnicas microscópicas, como la AFM, entre otras (Dobson, 2004).

Estrategias terapéuticas para las enfermedades amiloides.

Simultáneamente, el desarrollo de los procedimientos experimentales permite abordar diferentes estrategias terapéuticas efectivas para combatir la agregación y formación de fibras amiloides en las enfermedades relacionadas, así como la toxicidad implicada. Entre las principales estrategias para combatir las amiloidosis se encuentran el uso de moléculas pequeñas para estabilizar el estado nativo de una proteína, por ejemplo, el tafamidis sigue esta estrategia, se utiliza para un tipo de amiloidosis hereditaria que se encuentra mediada por una proteína llamada transtiretina. Por otro lado, se han explorado como alternativas para mitigar la toxicidad por amiloides, la estimulación de las vías de degradación de las células, por una parte, se encuentra la degradación mediada por un complejo proteínico llamado proteasoma, en el que

las proteínas son marcadas previamente con diferentes moléculas que permiten su reconocimiento y degradación, mientras que la degradación por un mecanismo llamado: autofagia, implica la intervención de cápsulas de lípidos que engullen a las proteínas, en dónde, finalmente son degradadas por el contenido de las vesículas, como pH ácido o enzimas que rompen a otras proteínas, llamadas proteasas, etc. Otra estrategia que se utiliza para contrarrestar la agregación de las proteínas es el uso de las chaperonas moleculares, debido a que este tipo de proteínas tienen la capacidad de cubrir las zonas hidrofóbicas de otra proteína, que se encuentran expuestas a la agregación, por lo tanto, se puede revertir la formación de estructuras oligoméricas tóxicas, restaurando la conformación nativa (Chuang, 2018). No obstante, también el uso de anticuerpos (proteínas del sistema inmune) o inmunoterapia, se ha estado desarrollando para combatir las enfermedades amiloides, un ejemplo de ello, es el uso de anticuerpos monoclonales (anticuerpos producidos por un solo tipo de células del sistema inmune llamadas células B) que son específicos para unirse al péptido amiloide β , implicado en la enfermedad de Alzheimer, este tipo de anticuerpos son administrados como inmunoterapia pasiva (la que se refiere a la administración directa de componentes del sistema inmune a una persona), para mantener concentraciones óptimas y permitir el control de posibles efectos adversos, como se ha demostrado que ocurre con la inmunoterapia activa, es decir, la administración directa de alguna partícula del patógeno o cuerpo extraño; sin embargo, el uso de estos anticuerpos como inmunoterapia pasiva, presentan inconvenientes como la administración repetida y altos costos (van Dyck, 2018).

Amiloides y biomateriales.

Adicionalmente, un área reciente e innovadora, gracias al descubrimiento de que una cadena polipeptídica en determinadas condiciones puede formar fibras amiloides, se ha aprovechado como una propiedad para el diseño y uso como un biomaterial, esto como una alternativa a los nanomateriales inorgánicos, como los nanotubos de carbono, ya que su fabricación y ensamblaje se puede llevar a cabo en condiciones acuosas suaves, representa menores costos de fabricación, y su diseño puede ser altamente controlado, debido a que se puede modificar la secuencia de aminoácidos. El principal uso del diseño de biomateriales basados en fibras amiloides es la creación de andamios, para el soporte de otros dispositivos o moléculas de interés, como los hidrogeles (materiales poliméricos elásticos y blandos, que se expanden al contacto con moléculas de agua) utilizados ampliamente en el área de la biomedicina. Además, este tipo de biomateriales resultan atractivos debido que cuentan con propiedades como la resistencia mecánica y a diversas condiciones, como temperaturas altas, a agentes desnaturalizantes o detergentes (Mitraki, 2010).

Conclusión

La estructura y plegamiento de las proteínas son fundamentales para el desempeño de la función biológica de las proteínas, ya que por una parte y en la mayoría de los casos, el estado nativo corresponde al estado funcional de las proteínas, aunque estados estructurales como las fibras amiloides juegan un papel fundamental para la regulación y activación de determinadas proteínas. Sin embargo, el estado amiloide está involucrado en una gran lista de padecimientos en humanos, por lo que

sigue siendo necesario estudiar el fenómeno del plegamiento para desarrollar nuevos mecanismos terapéuticos que intervengan o disminuyan en la gravedad de este tipo de enfermedades. Por otra parte, la naturaleza fibrilar de las proteínas resulta interesante para el aprovechamiento de las cadenas polipeptídicas como materia prima para el desarrollo de biomateriales beneficiosos.

Referencias

- Chiti F, Dobson CM. Protein Misfolding, Amyloid Formation, and Human Disease: A Summary of Progress Over the Last Decade. *Annu Rev Biochem*, 20(86), pp. 27-68, 2017.
- Chuang, E., Hori, A. M., Hesketh, C. D., & Shorter, J. Amyloid assembly and disassembly. *Journal of cell science*, 131(8), pp. 1-18, 2018. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5963839/>
- Dobson CM. Experimental investigation of protein folding and misfolding. *Methods*, 34, pp. 4-14, 2004.
- Dobson CM. Protein misfolding, evolution and disease. *Trends Biochem Sci*, 24(9), pp. 329-332, 1999.
- Mitraki A. Protein aggregation from inclusion bodies to amyloid and biomaterials. *Adv Protein Chem Struct Biol*, 79: pp. 89-125, 2010.
- Nelson DL, Cox M M. Lehninger. Principios de Bioquímica. Omega, España, 2019, pp. 75- 125.
- Otzen D, Riek R. Functional Amyloids. *Cold Spring Harb Perspect Biol*, 11(12), pp. 1-28, 2019.
- Swaminathan R, Ravi VK, Kumar S, Kumar MVS, Chandra N. Lysozyme: A model protein for amyloid research. *Adv Protein Chem Struct Biol*, 84: pp. 63-111, 2011.
- Valastyan JS, Lindquist S. Mechanisms of protein-folding diseases at a glance. *Dis Model Mech*, 7(1), pp. 9-14, 2014. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3882043/>
- van Dyck C. H. Anti-Amyloid- β Monoclonal Antibodies for Alzheimer's Disease: Pitfalls and Promise. *Biological psychiatry*, 83(4), pp. 311-319, 2018. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5767539/>

Ponte las pilas: desecha seguro



**Ing. Amb. Marisela Cruz Rivera
Dra. Alejandra M. Navarrete López
Dr. Ulises Rojas Zamora
Dra. Mónica L. Salazar Peláez
Departamento de Ciencias Básicas
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco**

Abstract

The demand for various energy storage devices has increased significantly in recent decades, and this trend is expected to continue indefinitely. The problem associated with this tendency is that batteries can contain different elements that harm both human health and the environment. Therefore, different standards and programs have been designed to ensure the proper disposal of these devices at their lifespan end. Thus, the present work analyzes the different components of batteries and their impact under diverse final disposal scenarios. It is extremely important to know the effects that technological development has on the environment and our health. From this, we get involved by participating in the execution of different measures to minimize them.

Keywords

Batteries, Environmental impact, Final disposal, Recycling.

Resumen

La demanda de toda clase de dispositivos de almacenamiento de energía ha aumentado de manera importante en las últimas décadas y se prevé que esta tendencia se mantenga indefinidamente. El problema asociado con este fenómeno es que las pilas pueden contener en su estructura diferentes elementos de impacto nocivo en la salud humana y el ambiente. Por ello, se han diseñado diferentes normas y programas que ayudan a la adecuada disposición de estos dispositivos al final de su vida útil. A partir de ello, el presente trabajo se centra en exponer los diferentes materiales componentes de las pilas y el impacto que se puede tener bajo distintos escenarios de disposición final. Es de suma importancia conocer los efectos que tiene el

desarrollo tecnológico sobre el ambiente y nuestra salud para que, a partir de esto, nos involucremos participando en la ejecución de distintas medidas para minimizarlos.

Palabras claves

Pilas, disposición final, reciclaje, impacto ambiental.

Introducción

Hablar de los efectos negativos de las actividades humanas sobre el ambiente es algo común. En agosto de 2021, la ONU puso en evidencia la gran influencia de la actividad humana en el desarrollo de este fenómeno en su informe de cambio climático.

Los seres humanos estamos acostumbrados a vivir de la mano del desarrollo tecnológico, ignorando o minimizando todas las repercusiones que este trae consigo al ambiente y a nuestra salud individual y como especie. En este sentido, hemos afectado nuestro derecho a gozar de un ambiente sano, como lo marca el artículo 4^o de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

Lo anterior es consecuencia de la falta de interés y conciencia con respecto a los beneficios y servicios que nos brinda el ambiente, claramente fomentada por el modelo económico actual, centrado en el consumo intensivo de bienes y servicios, que tiene como consecuencia directa el deterioro continuo de los ecosistemas.

Aunque existen infinidad de temas sobre el daño que estamos ocasionando al planeta, en este trabajo nos centraremos en el análisis de la contaminación que causa la producción, uso, desecho y disposición

de las pilas. Este tema cobra especial relevancia cuando se considera que el consumo de estos productos ha aumentado de forma considerable y continua durante las últimas décadas.

Según datos del Banco de Información Económica (BIE) del INEGI, el mercado de acumuladores y baterías creció alrededor de un 25 % en 6 años, pasando de aproximadamente diez mil millones de pesos en 2013 a más de doce mil millones y medio de pesos en 2019. En sintonía con dicho incremento, una importante marca de dispositivos almacenadores de energía reporta que, cada segundo, se venden en promedio 63 de sus productos, con crecimiento anual constante de ventas desde el 2010, llegando a 2400 millones de dólares en ventas anuales.

Un dato del 2016, recabado por la Asociación Latinoamericana de Pilas y Baterías estimó que en México cada habitante consume, en promedio, 6 pilas no recargables al año, predominando las pilas de carbón-óxido de zinc, con más del 75 % del mercado. Es importante mencionar que, a partir de 2001 se suspendió la producción de pilas en el país, por lo que el 100 % de las pilas comercializadas son importadas. También existe un mercado informal que abastece una buena parte de las pilas que se utilizan, el cual está soportado a partir de la venta en mercados fijos y ambulantes, o a partir de vendedores ambulantes en el transporte público.

A pesar del consumo y uso extensivo de estos dispositivos, la sociedad no tiene pleno conocimiento sobre su potencial contaminante, lo cual se debe en parte, a la falta de información actualizada con respecto a su producción y a los impactos ambientales ocasionados por su fabricación,

consumo y disposición. Además, debido a su corto periodo de vida, las baterías representan un problema global que debe atenderse, no solo porque estos artículos se convierten en residuos después de poco tiempo de uso, generando varios miles de toneladas de desechos que pueden provocar daños a la salud y el ambiente derivados de su incorrecto manejo, sino también porque aumenta la velocidad a la cual se extraen las materias primas necesarias para su producción.

Debido a lo anterior, resulta fundamental analizar los diferentes impactos derivados del consumo extensivo y la disposición final de las baterías en el ambiente una vez que ha concluido su vida útil.

Pilas y/o baterías, ¿son lo mismo?, ¿todas son iguales?

Las baterías constituyen elementos portadores de energía que permiten el funcionamiento de diversos dispositivos electrónicos sin la necesidad de conectarlos a la corriente, haciendo posible que podamos usar nuestro celular, reloj, audífonos, laptop y muchos otros artículos que hacen nuestra vida más cómoda. Generalmente, se utilizan los términos “pila” y “batería” de forma indistinta; sin embargo, es importante resaltar que el primer término se refiere a elementos no recargables y el segundo a elementos cuya carga es recuperable.

La pila voltaica fue creada por Alessandro Volta en el año de 1800, pero ha ido evolucionando en los últimos 200 años para satisfacer las necesidades humanas, hasta convertirse en los novedosos dispositivos de almacenamiento de energía actuales. En nuestros días, los dispositivos de almacenamiento de energía están clasificados

según la tecnología y el componente o componentes principales en cinco grandes grupos: 1) primarios, 2) secundarios, 3) sistemas en red para almacenar energía (por ejemplo, la batería de flujo o la batería de sodio-azufre), 4) celdas de combustible y 5) capacitores electroquímicos, supercapacitores.

Los grupos de dispositivos primarios y secundarios son los que detallaremos debido a que son los más usados por el grueso de la población.

Los dispositivos de almacenamiento de energía denominados *primarios* típicamente no son recargables. En términos generales, están integrados por tres elementos principales: un ánodo (polo de carga negativa), un cátodo (polo de carga positiva) y un electrolito.

Las pilas funcionan a partir de reacciones de oxidación que se llevan a cabo en el ánodo, las cuales liberan electrones (e^-). Este proceso produce una diferencia de potencial que provoca la migración o flujo de los e^- hacia el cátodo; sin embargo, los e^- no pueden migrar directamente dentro de la pila, ya que el electrolito funciona como una barrera que lo impide. Por ello, si cerramos el circuito y conectamos un cable conductor externo a la pila, entonces los electrones fluirán a través de este, obteniéndose la energía necesaria para accionar nuestros dispositivos electrónicos (Figura 1). A partir de ello, podemos decir que una pila es un elemento en el que ocurren reacciones químicas espontáneas que generan una fuente de energía eléctrica directa a un voltaje constante, la cual es suministrada a un circuito externo.

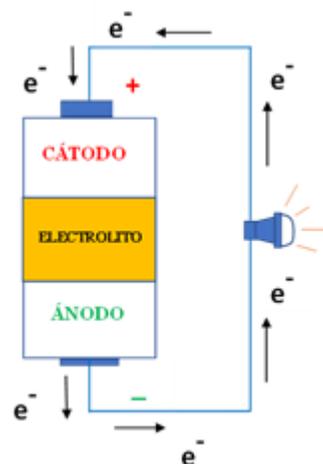


Figura 1. Esquema de un dispositivo de almacenamiento de energía primario

Los tipos de pilas más utilizadas son las llamadas *pilas comunes*, también conocidas como pilas de zinc-carbón, las cuales están constituidas por un recipiente sellado de zinc, que también sirve como ánodo. Este recipiente está cubierto internamente con un papel poroso, que lo separa del resto de los componentes de la pila. El cátodo es una varilla de grafito que ocupa el centro de la pila, y el resto del recipiente está lleno de una mezcla de cloruro de amonio, óxido de manganeso, cloruro de zinc y una carga porosa inerte (arena), que en conjunto actúan como el electrolito (Figura 2). Aportan un voltaje aproximado de 1.5 voltios. Las *baterías alcalinas* se asemejan a las pilas comunes, salvo que el electrolito es alcalino porque contiene hidróxido de potasio, de aquí su nombre, y la superficie interna del recipiente de zinc es rugosa.

Por su parte, las *pilas de mercurio* se asemejan a las pilas alcalinas, pero, en lugar de óxido de manganeso y cloruro de zinc, están rellenas de una pasta de

óxido de zinc y óxido de mercurio. Están reguladas por el Convenio de Minamata, que restringe su importación y exportación, y en donde se establece que deben tener contenidos de mercurio menores al 2 %.

Las baterías alcalinas y las de mercurio tienen una vida más larga y soportan un trabajo más pesado que las pilas comunes, además de ser recargables, por lo que es común encontrarlas en los automóviles, teléfonos celulares y tabletas electrónicas, entre otros dispositivos. Debido a sus características, se desechan en una proporción considerablemente menor que las primarias. Sin embargo, con el aumento en la producción y consumo de dichos dispositivos, la demanda de baterías recargables ha aumentado de manera significativa y comienza a ser un problema la manera de desecharlas.



Figura 2. Esquema de un dispositivo de almacenamiento de energía primario

Finalmente, el uso de las **baterías de ion litio** ha aumentado en los últimos años, especialmente debido a que tienen

bajo peso, estabilidad química, resistencia a altas temperaturas y, además, se pueden recargar muchas veces. Tienen un ánodo hecho generalmente de grafito, con espacios diminutos que le permiten incorporar iones y átomos de litio; mientras que el cátodo está compuesto por un óxido de un metal de transición, como el cobalto o el hierro. Estas baterías se utilizan para vehículos eléctricos y en algunas herramientas motorizadas.

Toxicidad de las pilas

Dentro de su estructura, algunas pilas, en especial aquellas que no son de última generación o que no son fabricadas por marcas certificadas, contienen cantidades considerables de metales pesados, como plomo, cadmio y mercurio y otros compuestos reconocidos por su alta ecotoxicidad. Estos metales se encuentran actualmente normados, por lo que son reconocidos como altamente contaminantes y han dejado de utilizarse en su fabricación o sólo pueden utilizarse en cantidades mínimas definidas.

En general, la exposición o la acumulación de metales pesados en nuestro cuerpo tiene efectos considerablemente negativos, tales como daños al sistema nervioso central, enfermedades cardiovasculares y diferentes tipos de cáncer. La forma en que se acumulan en el ambiente y en que pueden llegar a nuestro cuerpo se presenta en la Figura 3.

Normativas aplicables a la gestión de pilas

El marco legal vigente considera que las pilas pueden ser residuos **peligrosos** o **de manejo especial**, según el tipo y cantidad de metales que contengan. Ambos tipos de residuos están sujetos a un plan específico

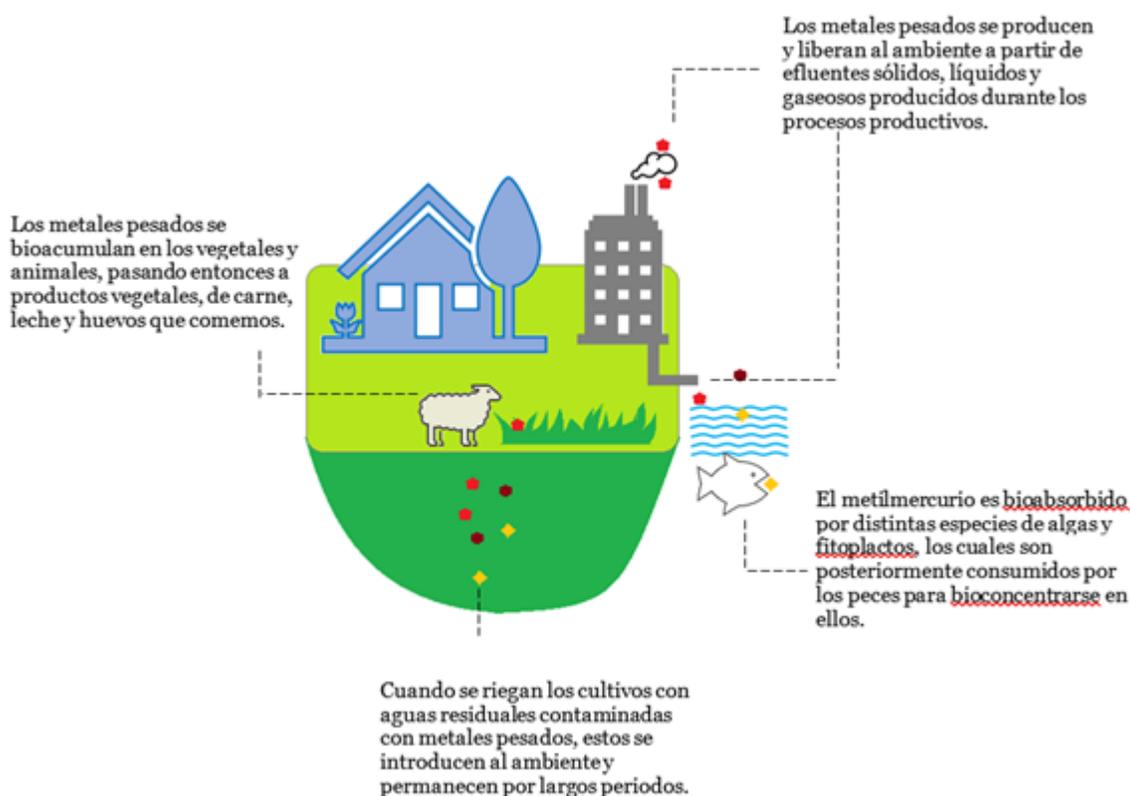


Figura 3. Descripción de la acumulación de los metales pesados (Hg, Cd y Pb) en el ambiente (adaptado de Aconsa (2021)).

de manejo. De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y la Norma Oficial Mexicana (NOM-052-SEMARNAT-2005), las pilas de zinc-óxido de mercurio (Zn-HgO) y las pilas de níquel-cadmio (Ni-Cd) son residuos peligrosos debido a que contienen metales pesados en cantidades iguales o mayores a las establecidas en dicha norma

A su vez, la LGPGIR también establece que las pilas que contienen litio, níquel, mercurio, cadmio, manganeso, plomo, zinc o cualquier otro elemento que permita la generación de energía son residuos de manejo especial, debido a que contienen cantidades de metales mayores a los límites establecidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-052-SEMARNAT-2005).

Con base en lo descrito, la presencia de metales pesados y otros contaminantes en las pilas ha motivado a las autoridades de nuestro país a emitir normas en la materia. La Norma Oficial Mexicana (NOM-212-SCFI-2017) establece los límites máximos permisibles de mercurio y cadmio por unidad de pila primaria; para el caso del mercurio es de 0.0005 % en peso y para el cadmio de 0.0020 % en peso.

Dicha NOM es aplicable a las pilas y baterías primarias que se importan o comercializan en territorio nacional, por lo que las pilas que entran legalmente al país tienen que cumplirla. Sin embargo, alrededor del 40 % de las pilas, unos 260 millones de unidades, que se comercializan en el territorio nacional pertenecen al mercado informal (El Financiero, 2013), las cuales, debido a su propio origen, probablemente no cumplen con los límites permisibles de contenido de elementos tóxicos, además de que tienen un tiempo

de duración más corto y, por lo tanto, se desechan más rápidamente, generando una mayor cantidad de residuos. En muchas de ellas se utiliza cartón como carcasa por lo que, al llegar a los sitios de disposición o incluso cuando todavía están en uso, se libera fácilmente su contenido; a diferencia de los productos legales que cumplen con las especificaciones de calidad, donde la carcasa es de metal. Debido a lo anterior no es recomendable su compra ni uso (Figura 4).



Figura 4. Pilas del mercado informal y legales.

¿Cómo afectan al ambiente las pilas cuando se convierten en residuos?

Una vez que termina su periodo de vida útil, las baterías se desechan comúnmente mediante cuatro métodos: compostaje, incineración, vertido y reciclaje (Olivetti et al., 2011). En cualquier método de disposición existe la posibilidad de liberar metales pesados y otros contaminantes al medio ambiente a través de lixiviados de rellenos sanitarios o gases de chimenea de incineración.

Cuando se incineran, los metales pesados pueden concentrarse en las cenizas o difundirse a la atmósfera a través de las emisiones de las chimeneas; mientras que

cuando se desecha la ceniza, los metales pueden filtrarse al suelo, así como al agua subterránea y superficial (Grover et al., 2019).

En los rellenos sanitarios y en los sistemas de composteo, los residuos sólidos urbanos (RSU) son el tipo de desecho más común. Después de su disposición, los residuos sólidos se someten a distintos procesos de descomposición en los que se produce una fracción líquida con una alta concentración de contaminantes, definida como lixiviado. Los lixiviados son soluciones ácidas o alcalinas que contienen cantidades sustanciales de metales y metaloides (Yang et al., 2020), los cuales se producen cuando el agua se filtra a través de los residuos en descomposición, arrastrando y disolviendo contaminantes orgánicos e inorgánicos (Figura 4). Los factores que afectan la formación de lixiviados incluyen la cantidad de agua que ingresa al vertedero a través de las lluvias, la composición de los desechos (% de humedad) y su biodegradabilidad (Olivetti et al., 2011).

En el caso de las pilas, las condiciones climáticas de temperatura, humedad y los procesos biológicos de fermentación natural de los residuos provocan la corrosión de la carcasa (envoltura) y la liberación subsecuente de sus componentes. El impacto más grande de los desechos de baterías es la penetración de contaminantes en el suelo, lo cual influye en su nivel de ecotoxicidad. Esto se debe al hecho de que, durante la lixiviación, los metales se difunden y absorben a través de la capa del suelo y por las plantas, así como en la atmósfera a través de procesos de volatilización, lo que genera fenómenos como la acumulación de sustancias nocivas que entran en aguas subterráneas y superficiales, en el suelo y se dispersan en la atmósfera (Grover et al., 2019). Este fenómeno se describe en la Figura 5.

Actualmente, dentro del mercado formal, las principales marcas producen pilas y baterías de última generación, las cuales emplean materiales que no suponen riesgo para el ambiente, como el zinc, dióxido de manganeso y grafito. Algunos diseños

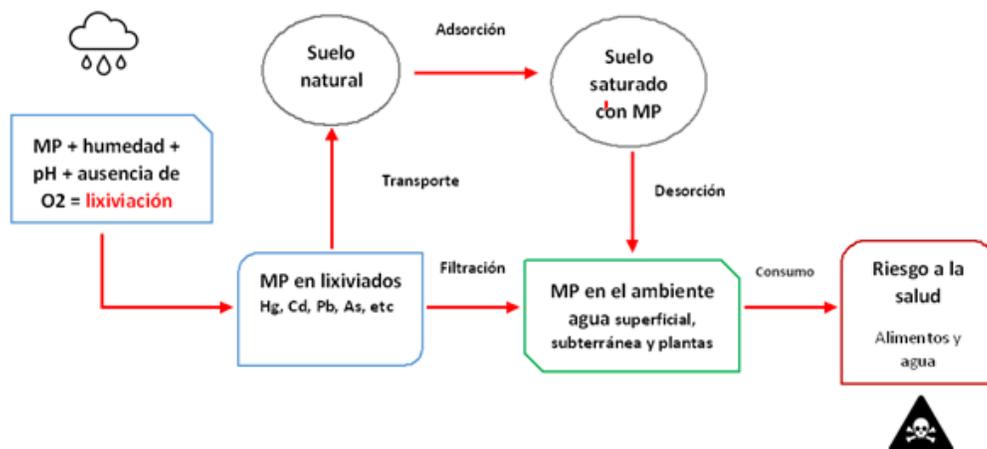


Figura 5. Proceso de lixiviación y transporte de los metales pesados (MP) y contaminantes contenidos en las pilas (adaptado de Huseein et al. 2021).

incorporan una carcasa de acero de una pieza con abertura única en la base, que hace más fácil la extracción de las partículas de manganeso y el núcleo de zinc para su posterior recuperación y reciclaje.

Tomando en cuenta lo descrito, es importante entender que el impacto de las baterías al ambiente no se produce únicamente durante su descomposición cuando se convierten en residuos, sino que sus procesos de manufactura y uso también tienen implicaciones importantes. En este sentido, la herramienta de análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología utilizada para evaluar los efectos naturales vinculados a todas las fases de la vida del producto.

Cuando el ACV evalúa el impacto de las etapas desde la obtención de materias primas, procesamiento de estos materiales, fabricación y difusión y venta, el ciclo se conoce como estudio de “la cuna a la puerta” (cradle to gate, por sus siglas en inglés), sin embargo, cuando además se consideran los impactos derivados del uso, reutilización y/o reciclaje, el ciclo completo se conoce como estudio de la “cuna a la

tumba” (cradle to grave, por sus siglas en inglés). En el caso de las baterías, el ACV implica las 4 etapas principales que se muestran en la Figura 6.

En la primera etapa del ACV, se analizan los impactos ambientales que tienen la extracción de las materias primas necesarias para la elaboración de las pilas. En el caso de las baterías de zinc-óxido de manganeso, se evalúa el impacto que tiene la extracción del manganeso, el zinc y el carbón. Este se realiza en procesos de minería tanto subterránea como a cielo abierto y puede causar contaminación del agua y del suelo. Precisamente, la emisión de material particulado a la atmósfera, las excavaciones en el terreno y la liberación de metales pesados son los principales impactos ambientales asociados.

En la segunda etapa del ACV, se analizan los impactos ambientales que tienen la fabricación y el embalaje de dichos dispositivos, tales como la contaminación del aire y el agua, el agotamiento de recursos no renovables y las afectaciones a la salud humana y a los ecosistemas. En esta etapa

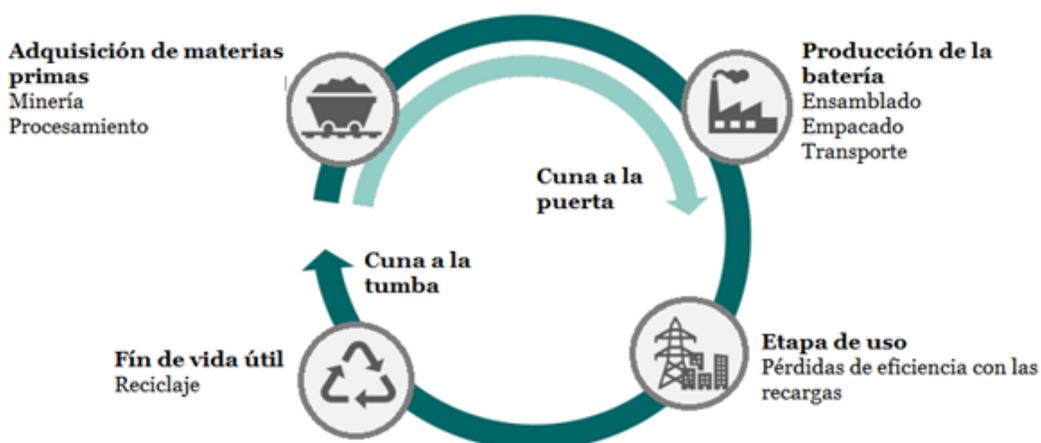


Figura 6. Etapas del ciclo de vida de baterías (adaptado de Liu,2020).

se encontró que la fabricación de una pila consume 50 veces más energía de la que puede llegar a producir.

En la tercera etapa se analizan los impactos que tiene el uso de las pilas. Estos impactos se ven aumentados por la obsolescencia con la que son diseñados algunos productos tecnológicos, programándolos para que dejen de funcionar después de determinado tiempo e incrementen sus ventas. Los impactos incluyen la contaminación del aire por el transporte de estos materiales a los puntos de comercialización y la emisión de gases de efecto invernadero durante su uso en los dispositivos electrónicos.

En la última etapa del ACV, se analizan los impactos de la disposición final de las baterías cuando han cumplido con su vida útil. Para el año 2017, la generación estimada de pilas como residuos fue de 67.18 toneladas correspondientes a pilas de zinc-óxido de manganeso, de 2.19 toneladas de pilas alcalinas y 5.72 toneladas de otros tipos de pilas y baterías (SEMARNAT, 2020). Por otra parte, Castro y Díaz estimaron en 2004 que, durante un periodo de 43 años, se dispusieron en México un aproximado de 653,000 toneladas de pilas, lo que representó la liberación en el ambiente de 145,918 toneladas de óxido de manganeso, 1,232 toneladas de mercurio, 22,063 toneladas de níquel, 20,169 toneladas de cadmio y 77 toneladas de compuestos de litio.

Los principales impactos encontrados en esta última etapa son los comentados previamente, y descritos en la Figura 6.

De acuerdo con un estudio en el que se llevó a cabo el ACV de un paquete de baterías de ion litio, con 6,500 ciclos de

carga en promedio durante su vida útil, el principal impacto se encontró en el rubro de escasez de agua, pues al contener ácidos en su formulación, el proceso de reciclaje y tratamiento de los residuos derivados de las pilas demanda altos volúmenes de agua potable. Así mismo, también se tiene un impacto importante en el rubro de cambio climático, siendo la etapa de uso de las baterías la que tiene la mayor contribución (60-80 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero), debido a los continuos ciclos de recarga en los que se consume energía eléctrica, producida en muchos casos a partir de la quema de combustibles fósiles. Sin embargo, el impacto en cambio climático se ve reducido en un 16 % cuando los elementos de las pilas se recuperan durante la etapa de reciclaje. Adicionalmente, el uso de baterías tiene efectos importantes de generación de efluentes residuales ácidos, debido a los ácidos fuertes que se utilizan durante el procesamiento de los metales aplicados en las carcasas y electrodos (Liu, 2020).

En otro estudio de ACV, se comparó el impacto ambiental de tres diferentes tipos de baterías: plomo-ácido (PA), litio-manganeso (LM) y litio-fosfato de hierro (LPF) (Wang et al., 2018). En este caso, se encontró que las baterías que producen el menor impacto al ambiente son las de LPF, mientras que las más contaminantes son las de PA, siendo la etapa de mayor impacto el refinamiento del plomo y estaño durante el proceso de minería. Específicamente, se encontró que las baterías basadas en plomo tienen los peores impactos en los rubros de toxicidad humana, ecotoxicidad de agua potable, ecotoxicidad marina y agotamiento de los metales, por lo que es importante que los gobiernos a nivel global tomen en cuenta este tipo de información para evitar

la producción de este tipo de baterías, y en general, adoptar medidas para el reciclaje y la recuperación de elementos de valor, con lo cual se reducen los efectos. Algunas de las medidas tomadas por la iniciativa pública y privada se describen a continuación.

Minería Urbana

Se define el concepto de Minería Urbana del término acuñado en los últimos años como Urban Mining (UM) como todas las actividades y procesos relacionados con la recuperación de compuestos, energía y elementos de productos, edificios y residuos generados a partir de ciclos urbanos (Di Maria et al., 2013). En este término se engloba también la recuperación de objetos en desuso que se hayan almacenado en domicilios particulares, y que constituyen una tipología de residuo con potencial interés de estudio.

La extracción de litio y otros metales a partir de pilas y baterías desechadas es una alternativa viable que permite valorizar diferentes componentes de los dispositivos que, de otra forma, terminarían dispuestos en rellenos sanitarios, impactando negativamente al ambiente.

Acciones en la CDMX

En la ciudad de México desde hace algunos años se puso en operación el programa llamado Ponte Pilas con tu Ciudad, el cual consiste en depositar las pilas usadas de cualquier tamaño (AA, AAA, etc., de botón y de celular) en alguna de las 400 columnas que forman parte del mobiliario urbano y que funcionan como centros de acopio. Esto permite la gestión segura de estos residuos, los cuales son recolectados por una empresa especializada en periodos

quincenales, para ser posteriormente transportadas y almacenadas temporalmente en un centro de acopio en el municipio de Naucalpan, Estado de México. Una vez que se recolecta una masa de pilas residuales mayor a una tonelada, estas son transportadas a una planta de reciclaje en donde inicialmente se recupera la carcasa de las pilas para reutilizarse en la fabricación de alambre, llaves, varillas, partes para autos, etc. Posteriormente, se recuperan metales como litio, cadmio, níquel y zinc, que son reutilizados en cadenas productivas.



Figura 7. Columna para depositar las pilas usadas en la CDMX.

En particular, la recuperación de residuos a partir de pilas alcalinas permite la producción de materias primas secundarias que pueden ser utilizados en la industria (zinc, dióxido de manganeso, acero) y sectores agrícolas (sulfato de potasio).

Para el año 2007, en el cual comenzó el programa, se lograron recuperar 16.5

toneladas de pilas. Esta cifra se ha incrementado anualmente hasta 2013, donde se alcanzó el máximo acopio de 113 toneladas, rebasando la meta anual de 50. Para el 2021, al corte del 28 de febrero se tenían ya 14.9 toneladas recuperadas (SEDEMA, 2021).

El futuro de las pilas: Desarrollo de baterías de ion sodio

Actualmente se sigue desarrollando investigación sobre nuevas y mejores alternativas para la construcción de baterías y pilas. Es conveniente contar con baterías recargables, poco contaminantes cuando se desechen y construidas con metales accesibles. Con base en ello, las baterías recargables de iones de sodio pronto podrían ser una alternativa más barata y que requiere menos recursos en comparación con las baterías actuales de ion litio, utilizadas no sólo en vehículos eléctricos, sino también en teléfonos inteligentes y computadoras portátiles (DW, 2020).

Los dos metales alcalinos, el litio y el sodio, son químicamente muy similares, pero el sodio está disponible de forma amplia, es decir, es abundante, barato y su obtención es con un bajo impacto ambiental. Hay mil veces más sodio que litio en la corteza terrestre, por lo que el costo de extracción y purificación del material es considerablemente menor.

Los cátodos de óxido metálico de sodio, que se utilizan normalmente en las baterías de ion sodio, se pueden fabricar a partir de metales abundantes como el hierro y el manganeso (Patel, 2021). Por el contrario, los cátodos de iones de litio utilizan cobalto, un metal con reservas geológicas limitadas y una cadena de

suministro centrada en unos pocos países. Por la parte del ánodo no hay cambios, es de carbono al igual que las baterías de iones de litio.

Además de las ventajas descritas, las pilas de ion sodio tienen un rango de temperatura más amplio que las de litio, no son inflamables y no hay fugas térmicas.

Con base en la información disponible actualmente, se proyecta que el costo de las baterías de iones de sodio será aproximadamente un 10-20 % menor que el de iones de litio.

La única desventaja importante de las baterías de ion sodio con respecto a las de ion litio es su menor densidad energética. Sin embargo, se ha abierto un extenso campo de investigación para aumentar su densidad energética mediante el desarrollo de mejores materiales para el ánodo y cátodo que resulten en densidades cercanas a las de las baterías de ion litio. En este sentido se ha propuesto el uso de materiales derivados de carbono obtenidos a partir de biomasa, los cuales se consideran altamente disponibles, con una huella ecológica reducida y que pueden usarse directamente en el ánodo y en el cátodo. Debido a ello, se consideran materiales altamente flexibles, con un impacto significativo en el marco de la química verde y la sustentabilidad (He et al., 2021). En conjunto, todas estas características permiten considerar a las baterías de ion sodio como productos más sustentables y muy efectivos para la demanda de energía.

Conclusiones

La demanda de equipos electrónicos aumenta anualmente y, por lo tanto, el desecho

de pilas, por eso es importante disponerlas correctamente, evitando que lleguen a los rellenos sanitarios donde sus componentes pueden ser liberados, contaminando el aire, el suelo y el agua.

Los datos sobre el consumo y disposición de pilas y baterías en México no son actuales, remontando en algunos casos a casi 20 años de antigüedad. Por ello, es de suma importancia que nuestro país cuente con información actualizada y veraz que ayude a diseñar e implementar políticas ambientales para su manejo, además de crear instrumentos, movimientos, industrias y programas que funcionen para gestionar de forma responsable los procesos de fabricación y disposición final de las pilas y otros desechos tecnológicos.

Es importante que los programas de recolección de pilas se extiendan a nivel nacional para recuperar la mayor cantidad posible de materiales y así reducir su impacto ambiental. Además, hace falta una mayor difusión para que tú, tus vecinos y cualquier ciudadano, se sumen a estas acciones.

Actualmente, se están desarrollando nuevas variantes de pilas, basadas en elementos con una mayor disponibilidad y empleando materiales sustentables, aunque su disposición inadecuada puede causar incendios, suponiendo un riesgo para las personas y el medio material y/o ambiente. Esperemos que estas nuevas tecnologías lleguen pronto a nuestras manos.

Finalmente, proponemos una serie de recomendaciones que te pueden ayudar a mejorar el manejo y reciclaje de las pilas y baterías que usas:

- No comprar pilas en el mercado informal, pues estas causan más daños al ambiente debido a que su fabricación y comercialización no están reguladas.
- Tomar conciencia e informarse sobre los daños a la salud y al ambiente de estos dispositivos para que seas capaz de conocer qué tipo de residuo se está generando.
- Separarlas de los residuos sólidos comunes y disponerlas adecuadamente, participando en los programas de acopio de pilas para disminuir su impacto ambiental.
- Comprar pilas recargables.

Bibliografía

Di Maria, F., Micale, C., Sordi, A., Cirulli, G., Marionni, M., Urban Mining: Quality and quantity of recyclable and recoverable material mechanically and physically extractable from residual waste, *Waste Manag*, 33 [12], pp. 2594-2599, 2013.

DW. The batteries of the future: Sodium instead of lithium. <https://www.dw.com/en/the-batteries-of-the-future-sodium-instead-of-lithium/a-54707542> (Recuperado el 15 de agosto de 2021)

El Financiero. Pilas piratas, con 40% del mercado en México. 2013. <https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/pilas-pirata-con-40-del-mercado-en-mexico/> (Recuperado el 26 de agosto de 2021)

Grover, S., y Sibi, G., Metal Leachate from Alkaline Battery Litters: A threat to Aquatic Organisms. *Int J Microbiol Curr*

Res, 1, [1] pp. 26-28, 2019.

He, X.-X., Liu, X.-H., Yang, Z., Zhang, H., Li, L., Xu, G., Qiao, Y., Chou, S.-L., Wu, M., Research progress of flexible sodium-ion batteries derived from renewable polymer materials. *Electrochemistry Communications*, 128, pp. 107067, 2021.

Liu, L. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Pack for Energy Storage Systems. The environmental impact of a grid-connected battery energy storage system. *UPPSALA UNIVERSITET*. ISSN: 1650-8300, 2020.

NOM-052-SEMARNAT-2005,
<http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/1055/SEMARNA/SEMARNA.htm> (Recuperado el 3 de septiembre de 2021)

NOM-212-SCFI-2017,
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5539835&fecha=03%2F10%2F2018
(Recuperado el 3 de septiembre de 2021)

Olivetti, E., Gregory, J., y Kirchain, R., Life cycle impacts of alkaline batteries with a focus on end-of-life. *Massachusetts Institute of Technology: Cambridge, MA, USA.*, pp. 2-5, 2011. Patel, B., Sodium-Ion Batteries Poised to Pick Off Large-Scale Lithium-Ion Applications. <https://spectrum.ieee.org/sodium-ion-battery> (Recuperado el 15 de Agosto de 2021)

SEDEMA. Ponte Pilas con tu Ciudad. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/ponte-pilas-con-tu-ciudad> (Recuperado el 3 de septiembre de 2021)

SEMARNAT,2020. Diagnostico básico

para la gestión integral de los residuos. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo2020.pdf> (Recuperado el 1 de septiembre de 2021)

Wang, Q., Liu, W., Yuan, X., Tang, H., Tang, Y., Wang, M., Zuo, J., Song, Z., Sun, J., Environmental impact analysis and process optimization of batteries based on life cycle assessment. *Journal of cleaner production*. 174, 1262-1273, 2018.

Yang, Z., Uhrynowski, W., Jakusz, G., Retka, J., Karczewska-Golec, J., Debiec-Andrzejewska, K., ... y Drewniak, L., Biochemical treatment of leachates from hydrometallurgical recycling of spent alkaline batteries. *Hydrometallurgy*, 191, pp. 105223, 2020.

Efectos tóxicos de MOF luminiscentes



Ing. Yuritxi Merary Mendoza Silva

Dra. Sandra Loera Serna

Universidad Autónoma Metropolitana

Unidad Azcapotzalco

Abstract

The new materials like the MOF (*Metal Organic Frameworks*) have had a greatest evolution and development due to the scientist's interest; this kind of material is highly exploitable. The LnMOF have been one of the main types of this kind of material due to their characteristic: luminescence. Luminescence and the kind of atoms from which they are formed (lanthanides) allow that this kind of materials have big application areas, making the toxicologic studies an important part of the investigation.

Keywords

LnMOF, Luminescent, toxic, photoluminescence, metal organic frameworks, lanthanides.

Resumen

Nuevos materiales como las MOF (*metal Organic frameworks*) han tenido una gran evolución debido al interés que los investigadores tienen en ellas ya que suelen ser un material altamente explotable. Los LnMOF han sido uno de los principales tipos de materiales desarrollados debido a la particular característica de la luminiscencia; la luminiscencia y el tipo de átomos (los lantánidos) con los que se forman estos materiales permiten áreas de aplicación muy variadas, por lo que los estudios toxicológicos de estos mismos se vuelven impredecibles.

Palabras clave

LnMOF, Luminiscentes, tóxico, fotoluminiscencia, redes metal orgánicas, lantánidos.

1. MOF luminescentes: definición, usos, importancia, cantidad de trabajos relacionados con las MOF

Las redes metal-orgánicas, mejor conoci-

das como MOF por sus siglas en inglés (*Metal-Organic Framework*), son una clase de materiales compuestos principalmente por iones metálicos, que se encuentran coordinados con ligandos del tipo orgánico, las cuales incluyen ciertos vacíos potenciales o poros. Este tipo de materiales forman una red de coordinación que pueden conformar una estructura uni-, bi- o tridimensional. Al estar formado de dos compuestos diferentes, siendo estos un ion metálico y un ligando, se denominan a menudo como materiales híbridos orgánicos-inorgánicos. Generalmente, la estructura de las MOF, así como sus características, están determinadas por el tipo de metal y del ligando del cual está conformada (Loera-Serna & Ortiz, 2016).

Una característica en común que tienen las MOF es la amplia porosidad, lo que permite tener una mayor superficie específica; de esta forma, se abre la posibilidad de introducir o "agregar" grupos funcionales en los ligandos, dándoles así la mejora de las interacciones entre la MOF y la solución/sustancia que quiere adsorberse. En la construcción de la red se pueden usar diferentes tipos de ligandos orgánicos funcionalizados o no, siendo los más comunes los de tipo carboxilato, por ejemplo, el ácido piridincarboxílico, ácido pirazincarboxílico, ácido imidazol carboxílico, ácidos S-heterocíclicos, entre otros. Particularmente, cuando se usan anillos aromáticos, se obtienen grandes ventajas debido a que sus electrones deslocalizados y su densidad del estado de energía, facilita la absorción de especies químicas (Garduño-Wilches *et al.*, 2021).

Debido a las características únicas de estos materiales, se les pueden dar diversos usos, por ejemplo: la catálisis, adsorción de gases, liberación de fármacos, sensores,

dispositivos fotoluminiscentes, entre otras (Loera-Serna & Ortiz, 2016; Ding *et al.* 2019). En particular, para que las MOF sean usadas en dispositivos fotoluminiscentes es necesario entender el fenómeno de luminiscencia. Cuando se habla de luminiscencia, se habla de la capacidad que tienen ciertas sustancias para absorber longitudes de ondas selectivas y emitir radiación. Esto debido a que los electrones de la estructura absorben la radiación, pasando a un estado excitado, para posteriormente emitirlos hacia el exterior, regresándolos a su estado inicial o basal (Luminiscente Canarias 2009).

La fotoluminiscencia de las MOF puede surgir de diversas posibilidades como:

a) Luminiscencia de ligandos orgánicos: generalmente tienen configuración π y conjugaciones de enlaces, con estructuras rígidas como el pirano, antraceno y sus derivados.

b) A base de metal: en las que se encuentra una MOF con un centro metálico lantanoide

c) Transferencia de carga metal-ligando. A este tipo de transferencia se le denomina también transferencia oxidativa; es aquella en la que el electrón pasa de un orbital que se encuentra centrado en el metal a un orbital centrado del ligando. Ej. MOF basada en Cu(I) y Ag(I).

d) Transferencia de carga ligando-metal. Este tipo de transferencia es conocida también como transferencia reductiva, pues el metal se reduce. En este proceso, el electrón pasa del orbital centrado en el ligando a uno que se encuentra centrado en el metal. Ej. MOF con ligando Zn(II)/Cd(II) y carboxilato.

e) Efecto antena: “un ligando orgánico (también denominado antena o sensibilizador) se coordina al ion lantánido e induce su emisión luminiscente, mediante una excitación indirecta”. El electrón interactúa y tiene resonancia con la radiación electromagnética entrante, haciendo posible que exista una excitación hacia niveles más altos de energía. Cuando se produce la relajación de los electrones, éstos pueden transferir la energía al ion metálico, produciendo así la emisión de luz. Cuando los carboxilos aromáticos son utilizados como ligandos en el efecto antena, los iones lantánidos coordinados tienen una mayor estabilidad luminiscente que con otros ligandos orgánicos ().

f) Sensibilización: MOF con efectos absorbentes que transmiten iones lantanoideos (Garduño-Wilches *et al* 2021; Marques *et al* 2013; Hao *et al* 2019).

Las MOF luminiscentes (LnMOF) son un tipo de red en el cual, el átomo de metal es un *metal de transición*: como puede ser el cromo (Cr) o manganeso (Mn) o una *tierra rara* de la familia de *los lantánidos*, generalmente son los iones: europio (Eu), erbio (Er), terbio (Tb), y tulio (Tm). Cada uno de estos iones emite un espectro de luz diferente, generando a su vez distintos tonos; en el caso del Eu y el Er forman principalmente luz roja, por su parte el Tb emite luz verde y el Tm luz azul (Garduño-Wilches *et al* 2021).

Las MOF de tierras raras son materiales altamente prometedores en cuestión de aplicaciones de luminiscencia debido a la naturaleza “blindada” de los electrones del orbital *f*, cuyas transiciones entre capas *f-f* (orbitales energéticos de los átomos) da como resultado las propiedades luminiscentes;

en el que la mayoría de iones lantánidos muestran diversas, estrechas y predecibles emisiones de luz, como la luz ultravioleta visible y la radiación infrarroja (Balderas *et al* 2019).

La incorporación de este tipo de iones en las MOF es alentadora, debido a que tienen grandes beneficios en la emisión. Por ejemplo, mantienen distancias mínimas entre iones emisores adyacentes, de la misma forma se disminuye el efecto de temple (quenching effect: es el efecto que hace referencia a cualquier proceso que disminuya la intensidad de la fluorescencia de cierta sustancia); además, los ligandos pueden trabajar como centros de absorción de energía, para transferir esa energía a los iones, excitándolos y promoviendo la emisión (Garduño-Wilches *et al* 2021).

En la formación de las MOF los ligandos orgánicos pueden ser escogidos de tal manera que se dé un mecanismo de transferencia de energía conocido como “efecto antena”, que se describió previamente. Por ejemplo, el ácido benceno-dicarboxílico (BDC), ácido benceno-tricarboxílico (BTC) y ácido tiofánico-dicarboxílico (TDC) son moléculas aromáticas que son adecuadas para la síntesis de MOF luminiscentes y además en su combinación con iones como el terbio se ha demostrado que se obtiene el fenómeno del efecto antena (Garduño-Wilches *et al* 2021). Se sabe que los iones lantánidos tienen la propiedad de la luminiscencia al realizar emisiones y transiciones en sus niveles energéticos, mediante varios mecanismos que son responsables de la luminiscencia de los LnMOF, los que se muestran en la Figura 1.

Los materiales híbridos lantánido-orgánicos, han tenido un desarrollo rápido en los úl-

timos años, debido a su cualidad de luminiscencia única, pues esta les permite ser partícipes en diferentes aplicaciones como: fluoroinmuno-ensayos, diodos emisores de luz, sistemas láser, amplificación óptica para telecomunicaciones, así como también en materiales magnéticos (H., Andrés., 2020) Debido a esto las LnMOF se han vuelto objeto de estudio interesante y novedoso para distintos fines, en la Tabla 1 se describen algunos de los trabajos publicados al respecto.

A pesar de su múltiple utilidad, y de las numerosas ventajas que este tipo de materiales aportan, es necesario hacer estudios toxicológicos para saber qué tan perjudiciales pueden ser y los cuidados que se deben tener cuando se usan dichos materiales.

2. Importancia de realizar estudios de toxicología de materiales

La ciencia de materiales es un campo que se encuentra en continuo desarrollo a partir de la obtención de nuevos materiales multifuncionales y con propiedades potencializadas; sin embargo, es necesario tener estudios de toxicología para saber de qué manera afectan estos nuevos materiales la vida del ser humano y el ambiente que lo rodea.

Pero, ¿cómo saber que un material es tóxico? Se sabe que la definición de toxicología es “la identificación y cuantificación de los efectos adversos asociados a la exposición a agentes físicos, sustancias químicas y otras situaciones”, y por su parte la toxicidad es “la capacidad intrínseca que posee un agente químico de producir efectos adversos sobre un órgano” (Silbergeld, s.f), o en su caso también en un cuerpo biológico; entonces para saber si un material es tóxico es necesario determinar

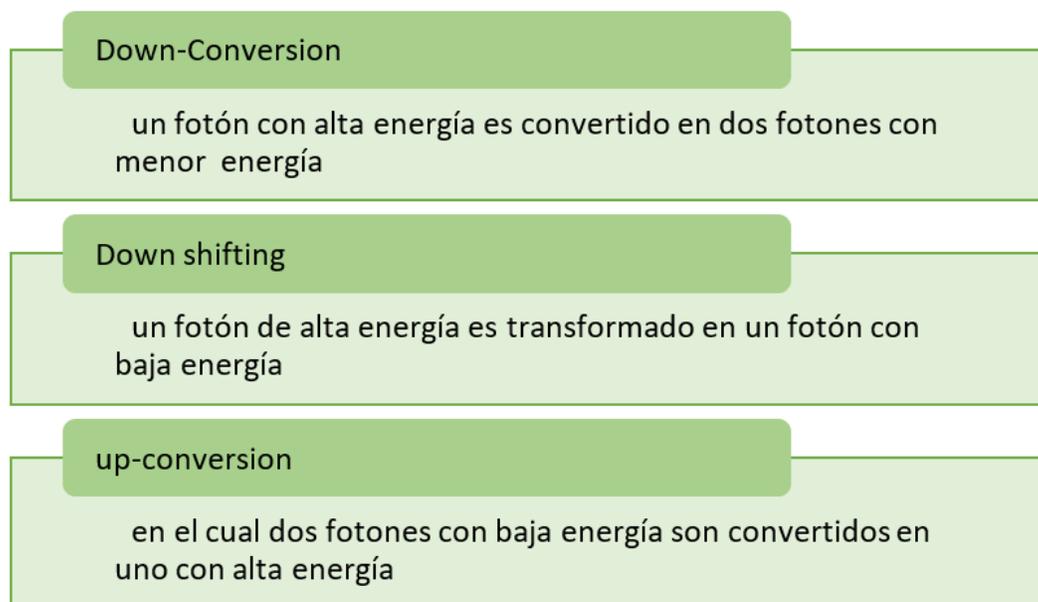


Figura 1. Mecanismos responsables de luminiscencia en las LnMOF (Balderas et al, 2019).

Material	Aplicación	Referencia
Tb-MOF	Sensor de diferentes compuestos orgánicos	(Guo et al, 2014)
Eu-MOF	Diseño de sensores luminiscentes	(Liu et al, 2019)
Lantánido bimetálico Eu-Tb MOF	Análisis de agua contaminada	(Zeng et al, 2017)
Eu/Tb-MOF	Sensor de temperaturas para diagnosis micro-electrónica	(Wang et al, 2017)
PA-Tb-Cu MOF	Diseño y fabricación de una nanoenzima para indicar concentración de H ₂ O ₂	(Qi et al, 2017)
Zn-MOF	Detección de sólidos explosivos	(Chaudhari et al, 2013)

Tabla 1. Trabajos realizados con LnMOF. *PA: ácido m-ftálico.

los límites en los cuales el material genera un daño específico. Una vez que se conocen dichos límites las organizaciones mundiales establecen normas o regulaciones del uso de las sustancias. Por ejemplo, en la Tabla 2 se presentan algunas normativas y su regulación, tanto en cuestiones medicas, como para el ambiente.

3. Toxicología de lantánidos

La familia de los lantánidos no es altamente tóxica por sí misma, por tanto, no presentan un gran problema para el medio ambiente, sin embargo, los iones de este tipo de átomos, en “combinación” con algunas otras sustancias y/o moléculas, presentan una toxicidad “elevada” en comparación a los átomos, volviéndolos así un tipo de riesgo para el medio ambiente y para quien los

maneja. Cada uno de los elementos de la familia de los lantánidos posee características similares, pero a su vez diferentes, por lo que el manejo de los compuestos formados con estos átomos debe de ser según dichas características.

Por ejemplo, cuando hablamos del ion de lantano, elemento por el cual esta familia recibe el nombre de lantánidos, al ser inyectado puede producir hiperglucemia, hipotensión arterial, degeneración del bazo, así como alteraciones hepáticas. También afecta al medio ambiente al momento de ser extraído, pues en este proceso, quedan residuos de La en el agua, pudiendo ocasionar problemas como la acumulación en la biota acuática que afecta a otras especies. (Baran, E., 2007).

NORMA	¿QUÉ REGULA?	Ref.
AMBITO DE LA SALUD:		
Ley de Control de Sustancias Tóxicas (TSCA 1976)	“Establece la prueba y la notificación de sustancias químicas antes de la fabricación, distribución y empleo”.	(ATSDR, 2019)
AMBITO AMBIENTAL:		
NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	“Establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados”.	(COFEPRIS, s.f)
Ley de Agua Pura (CWA 1972)	“Regula el vertimiento de contaminantes a las aguas de superficie”.	(ATSDR, I 2019)
Ley Integral de Respuesta, Compensación y Responsabilidad Ambiental (CERCLA 1980)	“Se encarga de lo relacionado con la limpieza de vertederos de desechos peligrosos y de definir los mecanismos de respuesta a los derrames de desechos peligrosos”.	(ATSDR, I 2019)

Tabla 2. Normas regulatorias de desechos tóxicos.

De la misma forma, el europio presenta ciertas características, siendo la más destacada su alta reactividad, pues es el elemento más reactivo de esta familia. Sus efectos en la salud suelen ser, principalmente, embolias pulmonares, debido a la inhalación de los gases de este elemento. Al ser desechado al medio ambiente, puede filtrarse a los mantos acuíferos o terminar en cuerpos de agua que posteriormente terminarían en la ingesta o utilización de las especies animales o de seres humanos; por ejemplo, en los animales acuáticos, la concentración del europio puede causar daños en la membrana celular (Baran, E., 2007).

4. Toxicología de LnMOF

Las LnMOF, como ya se mencionó anteriormente, tienen bastantes aplicaciones; cuando se trata de aplicaciones ligadas a

los seres vivos, debe de tenerse un especial cuidado en el manejo de la toxicidad que las MOF puedan tener. Existen diversos métodos para ver la toxicidad de los elementos que conforman este tipo de materiales, y estos van a depender del uso que vaya a dársele a la LnMOF. Uno de los lantánidos más utilizados es el europio, teniendo diversas aplicaciones en el área biológica como lo indica la Figura 2.

De manera similar, el terbio, que es otro lantánido de los más utilizados, y en general la serie de Ln^{3+} , tienen aplicaciones relacionadas en el área médico-biológica, resaltando así el interés de realizar estudios pertinentes a dichos materiales (LnMOF) con el fin de evitar algún daño al ser utilizados. Cuando se está utilizando un LnMOF en inmunoensayos, es importante que este tipo de complejos generen un porcentaje de inhibición, o lo aumenten, en

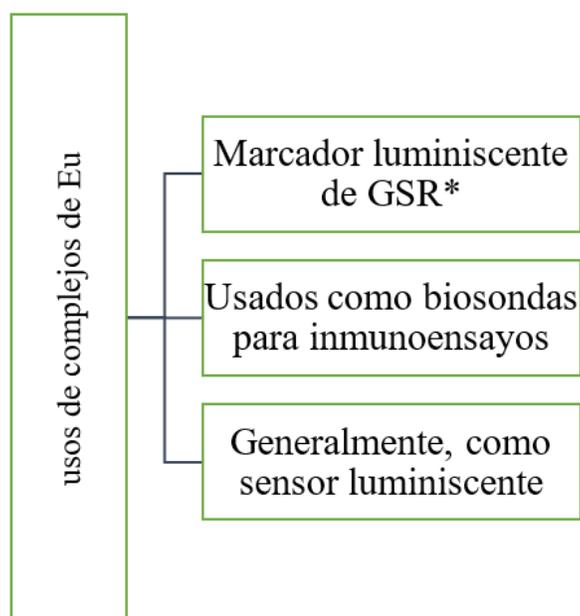


Figura 2. Aplicaciones de europio en el área biológica (Trupp, 2019). *GRS: Gun shoot residues (Residuos de disparo de arma de fuego)

el crecimiento de células tumorales, pues al ser compuestos con una parte orgánica, es necesario saber cómo es que los ligantes afectan a las células.

Uno de los estudios realizados para este fin fue el realizado por Cruz y colaboradores, donde colocaron una cantidad de células tumorales *in vitro*, añadiéndole diferentes concentraciones de la LnMOF, de determinados iones lantánidos (como Eu y Tb). De este estudio se concluyó que a medida que aumentan los sustituyentes metálicos en los ligantes, el efecto de la inhibición aumenta de manera considerable, sin embargo, no se presentó selectividad hacia el tipo de células cancerígenas, por lo cual se determinó que este tipo de compuestos no pueden ser utilizados en quimioterapia, pero debido a sus propiedades luminiscentes es posible utilizarlos como agentes de contraste para microscopía de fluorescencia (Cruz, 2018).

Otro ejemplo es el uso de LnMOF en el desarrollo de termómetros basados en luminiscencia debido a su exactitud, a que no son invasivos y a su auto-calibración, en los que se usan compuestos coordinados de lantánidos moleculares. En este estudio, se utilizó una LnMOF mezclada, siendo $\text{Nd}_{0.866}\text{Yb}_{0.134}\text{BTB}$, al cual se le realizaron estudios toxicológicos con un ensayo MTT que se basa en la reducción de la molécula MTT (Bromuro de 3-(4,5-dimetiltiazol-2-ilo)-2,5-difeniltetrazol) en el cual se determina la viabilidad mitocondrial de las células tratadas. Dicho ensayo se realizó en un feocromocitoma, un tipo de tumor (tumor benigno que se desarrolla en una glándula suprarrenal) de una rata; este tumor fue expuesto a diferentes concentraciones de $\text{Nd}_{0.866}\text{Yb}_{0.134}\text{BTB}$ por 24 h, para obtener posteriormente la curva de respuesta por MTT, en la cual se ve

una ligera disminución de la viabilidad de la célula conforme la concentración de la LnMOF aumenta. Los resultados indicaron que la LnMOF presenta una baja toxicidad y una excelente biocompatibilidad para la supervivencia neuronal. (Zhao *et al*, 2016)

Las LnMOF ha sido también usadas como marcadores de residuos de disparos (GSR por sus siglas en inglés), que es un estudio importante en la medicina/ciencia forense porque otorgan información esencial de crímenes, que les puede ayudar a encontrar sospechosos del caso (Lucena *et al*, 2017). El uso de los marcadores luminiscentes presenta la ventaja de que vuelven los residuos de disparos visibles bajo la luz UV (Lucena *et al*, 2017), además los marcadores luminiscentes poseen firmas químicas que les permiten identificar los GSR de manera convencional como NTA (nontoxic ammunition; munición no tóxica) (Talhari *et al*, 2020). Se usaron $[\text{Ln}(\text{DPA})(\text{HDPA})]$ (DPA: ácido dipicolínico, HDPA: dihidroxiacetona fosfato) y $[\text{Eu}(\text{BTC})]$, (BTC: ácido trimésico), como marcador con los que se realizaron diversos estudios en ratas para ver cómo afectaba la exposición de estos animales a dicho LnMOF. Se tomaron 2 grupos, de 3 ratas cada uno, los cuales se pusieron en cajas individuales a las que se les administró, mediante flujo de aire, el complejo $[\text{Eu}(\text{BTC})]$, por 14 días. También se realizó el estudio del efecto de este compuesto si se toma de forma oral; se hicieron 3 grupos de 3 ratas cada uno, en el que se les dio la dosis de dicho complejo, para posteriormente estar en experimentación 14 días. Y posterior a ese, se hizo un estudio de las heces y la orina, tomada cada cierto tiempo durante 48 h, para posteriormente analizar la presencia del marcador en las heces (Talhari *et al*, 2020). Los resultados indicaron que no hay riesgo de toxicidad al

estar en contacto con dicho complejo, de la misma forma la inhalación del complejo no causa daño alguno, para finalmente demostrar que ninguno de los órganos tuvo deformación o patología alguna después de la exposición al [Eu(BTC)], lo cual siempre dependerá de la cantidad de exposición que se tiene al complejo (Talhari *et al*, 2020; Lucena *et al*, 2017).

Las LnMOF abren la puerta a nuevas líneas de investigación debido a, como ya se mencionó, sus características modulables y sus propiedades fisicoquímicas, en particular la luminiscencia. Un material que presenta la propiedad luminiscente puede ser fácilmente detectado y, por lo tanto, su uso inmediato como sensor queda establecido en función de la respuesta del material al estímulo externo, otra cualidad muy importante es que, si una LnMOF se carga con un fármaco, esta podría ser utilizada como un trazador celular y dar evidencia de los efectos que el fármaco y el material *per se* podrían tener en las células. Empero, los estudios relacionados con la toxicología de las LnMOF son todavía muy escasos, es deseable que a los materiales cuyas perspectivas biológicas van en aumento, dadas sus aplicaciones, se les realicen estos ensayos de forma frecuente. Por tal motivo o como lo menciona Cruz *et al*. 2018, es que se deben realizar los estudios toxicológicos a los LnMOF, porque pueden ser instrumentos que determinen nuevas aplicaciones de los materiales. Sin embargo, si son empleados de la forma incorrecta, o en dosis que no son las adecuadas, pueden acarrear terribles consecuencias.

Conclusiones

El desarrollo de nuevos materiales con propiedades luminiscentes es altamente

innovador debido a que se obtienen ciertas características fisicoquímicas que les permiten tener múltiples aplicaciones, como las que se han mencionado en este documento. Las LnMOF han tenido un excepcional progreso en los últimos años, debido a la gran ayuda que proporciona su fotoluminiscencia; dicha cualidad también puede traer repercusiones, por lo que los estudios toxicológicos son necesarios para determinar el daño que pudieran o no causar este tipo de materiales. No hay suficientes estudios de toxicología en este tipo de materiales, por lo que se considera que es necesario que las investigaciones o propuestas de aplicación que se hacen al respecto de las LnMOF incluyan en sí mismos los informes toxicológicos, para saber de qué manera estos pueden influir en el ambiente que los rodea, así como los humanos que lo manejan y, en el caso médico, las personas que lo utilizan. De esta forma, y como se mencionó anteriormente, se puede prevenir daños no deseados al utilizarlo de la manera y cantidades correctas. Siendo así, los estudios entonces proporcionan la información suficiente para redactar “pros y contras” y comparar las LnMOF para saber cuál es la que conviene utilizar de acuerdo con el propósito requerido.

Referencias

1. ATSDR (2019) Agency for Toxic Substances and Diseases Registry. Módulo I - *Introducción a la toxicología | Tabla 1.1 Leyes del medio ambiente específicas a la EPA | ATSDR en Español*. (2019, 11 abril). Recuperado 30 de agosto de 2021, de https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology_curriculum/modules/1/es_laws.html
2. Balderas, J. U., Navarro, D., Vargas,

- V., Tellez-Cruz, M. M., Carmona, S., & Falcony, C. (2019). Ultrasonic spray deposition as a new route to luminescent MOF film synthesis. *Journal of Luminescence*, 212, 322-327
- 3.- Baran, E. J. (2007). La nueva farmacoterapia inorgánica. xviii. Compuestos de Lantánidos. *Latin American Journal of Pharmacy*, 26(4), 626.
4. Chaudhari, A. K., Nagarkar, S. S., Joarder, B., & Ghosh, S. K. (2013). A continuous π -stacked starfish array of two-dimensional luminescent MOF for detection of nitro explosives. *Crystal growth & design*, 13(8), 3716-3721.
5. COFEPRIS. (s. f.). Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, Normas Oficiales Mexicanas; Sustancias Tóxicas. Recuperado 30 de agosto de 2021, de <http://transparencia.cofepris.gob.mx/index.php/es/marco-juridico/normas-oficiales-mexicanas/sustancias-toxicas>
6. Ding, M., Cai, X., & Jiang, H. L. (2019). Improving MOF stability: approaches and applications. *Chemical Science*, 10(44), 10209-10230.
7. Garduño-Wilches, I. A., Alarcón-Flores, G., Carro-Gastélum, A., Carmona-Téllez, S., Aguilar-Frutis, M. A., & Loera-Serna, S. (2021). Enhanced photoluminescence quantum yield of terbium nano-MOFs synthesized by microwave assisted solvothermal method. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 26, 100736.
8. Guo, H., Zhu, S., Cai, D., & Liu, C. (2014). Fabrication of ITO glass supported Tb-MOF film for sensing organic solvent. *Inorganic Chemistry Communications*, 41, 29-32.
9. Hao, Y., Chen, S., Zhou, Y., Zhang, Y., & Xu, M. (2019). *Recent progress in metal-organic framework (MOF) based luminescent chemodosimeters*. *Nanomaterials*, 9(7), 974.
10. HK, A. (2020). 9 marcos de metal orgánico de lantánidos para aplicaciones luminescentes. En *9 marcos de metal orgánico de lantánidos para aplicaciones luminescentes* (p. 7). Instituto tecnológico metropolitano. <https://www.studocu.com/co/document/instituto-tecnologico-metropolitano/bioquimica/9-marcos-de-metal-organico-de-lantanidos-para-aplicaciones-luminescentes/6667520>
11. Liu, Y., Xie, X. Y., Cheng, C., Shao, Z. S., & Wang, H. S. (2019). Strategies to fabricate metal-organic framework (MOF)-based luminescent sensing platforms. *Journal of Materials Chemistry C*, 7(35), 10743-10763.
12. Loera-Serna, S., & Ortiz, E. (2016). Catalytic applications of metal-organic frameworks. Luis N, *Advanced Catalytic Materials-Photocatalysis and Other Current Trends*, IntechOpen, 95-122.
13. Lucena, M. A., Oliveira, M. F., Arouca, A. M., Talhavini, M., Ferreira, E. A., Alves Jr, S., Veiga-Souza, F., H., & Weber, I. T. (2017). Application of the metal-organic framework [Eu (BTC)] as a luminescent marker for gunshot residues: a synthesis, characterization, and toxicity study. *ACS applied materials & interfaces*, 9(5), 4684-4691.
14. Marques, L. F., Júnior, A. A. C., Ribeiro, S. J., Scaldini, F. M., & Machado,

- F. C. (2013). *Synthesis, structural characterization and photophysical properties of highly photoluminescent crystals of Eu (III), Tb (III) and Dy (III) with 2, 5-thiophenedicarboxylate*. *Optical Materials*, 35(12), 2357-2365.
15. Qi, Z., Wang, L., You, Q., & Chen, Y. (2017). PA-Tb-Cu MOF as luminescent nanoenzyme for catalytic assay of hydrogen peroxide. *Biosensors and Bioelectronics*, 96, 227-232.
16. Silbergeld, E. K. (s. f.). *Toxicología* (Revisado ed., Vol. 1). Recuperado de <https://www.insst.es/documents/94886/161958/Cap%C3%ADtulo+33.+Toxicolog%C3%ADa>
17. Talhari, A. L., Lucena, M. A., Mauricio, F. G., Oliveira, M. F., Veiga-Souza, F. H., Junior, S. A., & Weber, I. T. (2020). *Luminescent marker for GSR: Evaluation of the acute oral and inhalation toxicity of the MOF [eu (DPA)(HDPa)]*. *ACS Applied Bio Materials*, 3(5), 3049-3056.
18. Trupp, L. J. (2019). *Diseño, síntesis y caracterización de derivados de bases de Tröger como potenciales ligandos en complejos luminiscentes de iones lantánidos* (1.a ed., Vol. 1). Recuperado de https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n6680_Trupp.pdf
19. Zeng, X., Zhang, Y., Zhang, J., Hu, H., Wu, X., Long, Z., & Hou, X. (2017). Facile colorimetric sensing of Pb²⁺ using bimetallic lanthanide metal-organic frameworks as luminescent probe for field screen analysis of lead-polluted environmental water. *Microchemical Journal*, 134, 140-145.
20. Zhao, D., Zhang, J., Yue, D., Lian, X., Cui, Y., Yang, Y., & Qian, G. (2016). A highly sensitive near-infrared luminescent metal-organic framework thermometer in the physiological range. *Chemical Communications*, 52(53), 8259-8262.

FE DE ERRATAS

En el número 120 del año 2021, los autores del artículo titulado "Fibras de plástico de alto rendimiento: los polibencimidazoles", Declararon haber recibido apoyo financiero par la investigación, autoría y/o publicación de este artículo.

Desean agradecer a la DGAPA por el apoyo financiero (PAPIIT IG100420) y a la beca otorgada a Miriam García V.

Agradecemos su comprensión

Atentamente

Editora en Jefe y Comité Editorial



