

# Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

Octubre - Diciembre 2023

ISSN: 2683-2607

No. 131

**El LED blanco un verdadero hito en la historia  
de la tecnología de la iluminación**

**Polímeros inteligentes: Diseño y Estrategias**

**Santo Ilamando a Blue Demon: incorporación  
de nuevas tecnologías para estudiar  
la morfología de los corales**

**Ética e Inteligencia Artificial**



UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
METROPOLITANA

Revista de las divisiones de CBI y CBS



# Contenido

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería  
No. 131 Octubre - Diciembre 2023

Editorial	3	<i>¿Qué son los tratamientos descentralizados y por qué pueden ser una solución a la gestión hídrica en la Ciudad de México?</i>	39
<i>El LED blanco un verdadero hito en la historia de la tecnología de la iluminación</i>	5	Ing. Dulce Alejandra Zaragoza Ayala Dra. Mónica Liliana Salazar Peláez Dr. Ulises Rojas Zamora	
<i>Los gigantes del Pleistoceno mexicano: mamuts, mastodontes y gonfoterios</i>	12	<i>Uso de Solver como herramienta didáctica para optimización del tamaño de reactores de tanque agitado (RTA) mediante el método de maximización del área rectángulos</i>	49
M. en C. Alberto Eduardo Barrañón-Salmón Dr. César Antonio Ríos-Muñoz M. en C. Deborah V. Espinosa-Martínez Dr. Joaquín Arroyo-Cabrales		I.Q. Carlos Montaña Osorio Dr. Adolfo E. Obaya Valdivia Dra. Yolanda M. Vargas Rodríguez	
<i>Polímeros inteligentes: Diseño y Estrategias</i>	23	<i>Santo llamando a Blue Demon: incorporación de nuevas tecnologías para estudiar la morfología de los corales</i>	60
Dra. Catalina Haro-Pérez Dr. Eduardo Basurto Mtro. Carlos A. Vargas Dr. Gerardo Odriozola		Mtro. Sergio D. Guendulain-García Dr. Andrés López-Pérez	
		<i>Ética e Inteligencia Artificial</i>	67
		M. C. Alma E. Martínez Licona	

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. Javier Rodríguez Lagunas  
*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. Javier Rodríguez Lagunas  
Dr. Román Linares Romero  
Dr. José Luis Gómez Olivares  
*UAM- Iztapalapa*  
*Editora en Jefe:*  
M. C. Alma Edith Martínez Licona  
*Asistente Editorial:*  
Lic. Paula López Andrés  
*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. 131, Octubre - Diciembre 2023, es una publicación trimestral de la Universidad Autónoma Metropolitana a través de la Unidad Iztapalapa, División de Ciencias Básicas e Ingeniería y División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Prolongación Canal de Miramontes 3855, Col. Ex-Hacienda San Juan de Dios, Alcaldía Tlalpan, C.P. 14387, México, Ciudad de México y Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1a Sección, Iztapalapa, Cd. de México. C.P. 09310, Edificio T144, Tel. 5804 – 4600. Ext. 1144. Página electrónica de la revista: <https://contactos.izt.uam.mx/> y dirección electrónica: [cts@xanum.uam.mx](mailto:cts@xanum.uam.mx) Editora responsable MC Alma E. Martínez Licona. 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 Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Mtra. Alma E. Martínez Licona; Unidad Iztapalapa, División de CBI y CBS; fecha de última modificación 18 de Diciembre de 2023. Tamaño del archivo 12.3 MB.

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

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Fecha de Publicación: Octubre - Diciembre 2023.

Los artículos publicados en **Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería** son sometidos a arbitraje; para ello se requiere enviar

el trabajo en Word a <https://contactos.izt.uam.mx/>  
**Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería,**  
UAM – Iztapalapa, T144, Tel. 5804-4600. Ext. 1144  
Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186. C.P. 09310  
e-mail [cts@xanum.uam.mx](mailto:cts@xanum.uam.mx)

## Editorial

Hemos llegado al final del año 2023, y terminamos con este cuarto número, el cual nos brinda temas de interés, como la explicación de los LEDs los cuales son dispositivos de iluminación de estado sólido, en este artículo, el autor nos explica ¿Qué es la electroluminiscencia?, así que, los invito a leer “El LED blanco un verdadero hito en la historia de la tecnología de la iluminación”.

Por otro lado, en “Los gigantes del Pleistoceno mexicano: mamuts, mastodontes y gonfoterios” se presenta una revisión de las principales características anatómicas que definen a los proboscídeos mexicanos (mamuts, mastodontes y gonfoterios), con la finalidad de contar con información accesible y concreta que permita conocer las tres familias extintas que habitaron en lo que ahora es nuestro país: Elephantidae, Mammutidae y Gomphotheriidae, consideradas parte de la megafauna del Pleistoceno, periodo que abarcó desde 2.58–0.01 millones de años.

En “Polímeros inteligentes: Diseño y Estrategias” invito al lector averiguar si los polímeros realmente son inteligentes y en “Ética e Inteligencia Artificial” reflexionamos sobre la importancia de los valores éticos para la creación y uso de aplicaciones con Inteligencia Artificial.

Así como estos artículos, tenemos los siguientes: “¿Qué son los tratamientos descentralizados y por qué pueden ser una solución a la gestión hídrica en la ciudad de México?”, “Santo llamando a Blue Demon: incorporación de nuevas tecnologías para estudiar la morfología de los corales”, y “Uso de Solver como herramienta didáctica para optimización del tamaño de reactores de tanque agitado (RTA) mediante el método de maximización del área de rectángulos”.

Esperando que este número sea de su agrado, agradecemos por seguir apoyando a la revista tanto autores como lectores, el equipo de la Revista Contactos les desea un feliz fin de año. Seguiremos trabajando para mejorar cada edición de cada número de nuestra querida Revista Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería.

Atentamente  
*MC Alma E. Martínez Licona*  
**Editora en Jefe, Revista Contactos**



## 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 Times 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, T144,

Información: cts@xanum.uam.mx,

Tel. 5804-4600. Ext. 1144.

Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186.

C.P. 09310

### 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 LED blanco un verdadero hito en la historia de la tecnología de la iluminación**

**Dr. Ulises Caldiño García**  
*Departamento de Física,  
Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Iztapalapa*

### Abstract

When Dr. Nicholas Holonyak developed the first visible light-emitting diode (LED) in 1962, nobody imagined that half century later these very small light devices would replace the Edison's century-old incandescent light bulb. In those years, a LED was only the power indicator light in electronic devices. The LED technology has changed our environment, the way we light it, but what is behind the LED story? Let's discover the origins of the technology that has revolutionized completely the lighting market.

**Palabras clave:** Diodo emisor de luz (LED), Tecnología de la iluminación, Luz blanca, Luz ecológica.

**Keywords:** Light-emitting diode (LED), Illumination technology, White light, Ecological light.

Actualmente, la luz blanca puede ser generada mediante **diodos emisores de luz (LEDs)**, por sus siglas en inglés), que a diferencia de los focos incandescentes que generan luz mediante el calentamiento de un filamento metálico al rojo vivo, o de las lámparas fluorescentes que la generan por el choque caótico de electrones para excitar a los átomos en movimiento de un gas, tal que se dispersa buena parte de la energía, el proceso en los **LEDs** es basado en la **electroluminiscencia de un semiconductor**. En pocas palabras, un **LED** es un dispositivo de iluminación de estado sólido, y por lo tanto no se daña fácilmente con golpes externos, a diferencia de las lámparas fluorescentes e incandescentes que son sumamente frágiles.

### ¿Qué es la electroluminiscencia?

La electroluminiscencia, es un proceso eléctrico-óptico, por el que un material

fosforescente puede emitir luz al aplicarle electricidad. Este proceso lo observó por primera vez, en 1907, el capitán inglés Henry Joseph Round (1881-1966), de los laboratorios Marconi, usando cristales de carburo de silicio y un detector de bigotes de gato (Round, 1907).

### ¿Qué es un semiconductor?

Un semiconductor es un material sólido compuesto de tres capas. Una **capa n** con excedente de electrones, una **capa p** con excedente de huecos positivos, es decir con déficit de electrones, y una **capa activa** que se encuentra entre las capas p y n, hacia la cual son impulsados los electrones y los huecos positivos cuando se aplica una diferencia de potencial (tensión eléctrica) al semiconductor, ver Figura 1. Cuando los electrones y los huecos se recombinan, se genera emisión de luz, cuya longitud de onda depende del material semiconductor. La emisión de luz es entonces generada por el proceso de electroluminiscencia.

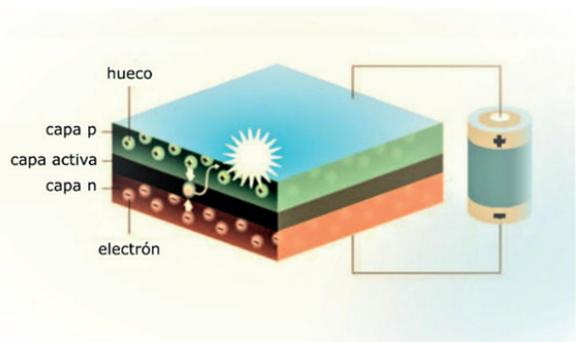


Figura 1. Diagrama esquemático de un LED semiconductor. (Fotografía: © Real Academia de las Ciencias de Suecia).

### El primer LED en el visible

Después de más de medio siglo que se observó por primera vez el fenómeno de la electroluminiscencia, el **primer semiconductor con emisión en el infrarrojo** (900 nm) fue presentado por Texas

Instruments Incorporated en 1961. Este **dispositivo** fue desarrollado por el ingeniero electricista, e inventor con 73 patentes, **James Robert Biard** (1931-2022) y el químico Gary Edmund Pittman (1930-2013), usando un semiconductor de **arseniuro de galio (GaAs)**. Actualmente los semiconductores con emisión en el infrarrojo se siguen utilizando como elementos transmisores en circuitos de control remoto, tales como los mandos a distancia. Al año siguiente, en 1962, el estadounidense de origen ruso, el **Dr. Nicholas Holonyak** (1928-), empleado de General Electric, logró obtener el primer **LED visible**, en el rojo, usando **fosfoarseniuro de galio (GaAsP)** como semiconductor y la técnica de emisión estimulada (Holonyak, 1962). La invención de este primer láser semiconductor visible (rojo) está catalogado entre los logros más destacados del siglo XX dado su popularidad en gran infinidad de aparatos y dispositivos electrónicos.

### **El largo camino para llegar a la invención del LED blanco**

Diez años después, en 1972, el ingeniero eléctrico estadounidense **George Crawford** (1938-), empleado del gigante Monsanto y exestudiante de posgrado del **Dr. Holonyack**, inventó el primer **LED amarillo**, mediante la combinación de luz verde y luz roja, usando **fosfuro de arseniuro de galio dopado con Nitrógeno (GaAsP:N)** (Sato, 2002). Con el **LED amarillo** solo faltaba encontrar un semiconductor que produjera luz azul para obtener el blanco. Sin embargo, encontrar el **LED azul** fue un verdadero calvario para la industria y la academia, quienes lo consideraron como una tarea imposible después de 27 años de múltiples intentos con infinidad de materiales semiconductores, entre ellos el **nitruro de galio**. No obstante, la obstinada per-

severancia del ingeniero y físico japonés, **Isamu Akasaki** (1929-2021), durante cerca de 3 décadas de persistente investigación, y al final junto con su estudiante de doctorado **Hiroshi Amano** (1960-), de la Universidad de Nagoya (Japón), lograron obtener el primer **LED azul de alto brillo** en 1989, usando películas semiconductoras de **nitruro de galio dopado con Mg (GaN:Mg)** (Amano, 1989). Posteriormente, en el año de 1993, el estadounidense de origen japonés **Shuji Nakamura** (1954-), un ingeniero investigador que trabajaba para la compañía japonesa Nichia, desarrolló mediante un método más sencillo y mucho menos costoso las películas **GaN** con una vida útil de más de 1000 horas, por lo que se pudo fabricar el **LED azul** a gran escala. Un año después, el ingeniero Nakamura lograría crear un **LED azul**, cien veces más brillante que cualquiera otro fabricado hasta entonces, empleando semiconductores de **nitruro de indio y galio (InGaN)** (Nakamura, 1994). Por fin, en 1996, llegó el **LED blanco**, cuando la empresa Nichia, a petición del ingeniero Nakamura, lo produjo agregando al **LED de InGaN** una capa de fósforo amarillo (**granate de aluminio-ytrio activado con iones de cerio trivalente:  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ , YAG:Ce<sup>3+</sup>**) al **LED azul** (Bando, 1998). Es importante mencionar que al referirnos a un material fósforo no es que contenga el elemento químico fósforo, sino más bien nos referimos a su capacidad de producir luz. En 2005 el ingeniero Nakamura, laborando en ese entonces como profesor de ingeniería en la Universidad de California, Santa Bárbara, recibió una indemnización de alrededor de 8.1 millones de dólares por parte de la compañía Nichia, para la que trabajó hasta 1999, por el desarrollo de los LEDs azules, dado que solamente había percibido un bono de 200 dólares por su

trabajo. Finalmente, los tres investigadores involucrados en la invención del **LED azul de alto brillo**, **Isamu Akasaki**, **Hiroshi Amano** y **Shuji Nakamura**, fueron galardonados en octubre de 2014 con el **premio Nobel de Física** por su invención de un eficiente LED azul, y su repercusión en el gran auge de fuentes de luz blanca brillante. Sin embargo, el Dr. Holonyak calificó esta decisión como *insultante* dado que sus colegas expresaron la creencia de que el Premio Nobel recaería en el Dr. Holonyak por su invención del LED rojo.

### **Las grandes bondades del LED blanco en la tecnología de la iluminación**

El **LED azul** ha permitido el desarrollo de fuentes de luz blanca brillante más sustentables, al no usar mercurio como las lámparas fluorescentes, y reducirse el gasto energético a tal grado que pueden funcionar usando sólo fuentes renovables, como la luz solar, y de esta manera se podría llevar la luz a más de 1,500 millones individuos que carecen de acceso a las redes de suministro eléctrico. Los **LEDs blancos** pueden producir hasta 300 lúmenes por vatio eléctrico, por lo que se han podido utilizar como fuente de iluminación a gran escala. Ellos son mucho más difíciles de fundirse porque casi no se calientan, emitiendo muy poca radiación infrarroja que pudiera dañar objetos o tejidos sensibles. De hecho, su encendido inmediato, en menos de un microsegundo, es porque no requieren de un tiempo de calentamiento como las lámparas fluorescentes. La poca energía perdida desaparece en forma de calor en la base del LED. Por lo tanto, los **LEDs** son hasta más de 3-6 veces más durables, (10-20 años o cincuenta-cien mil horas) que las lámparas fluorescentes de bajo consumo (quince mil horas). Por consiguiente, la tecnología de

la iluminación mediante **LEDs** podría ser una de las soluciones para reducir el gasto energético a nivel mundial, considerando que su emisión de luz se genera consumiendo aproximadamente el 50% de la energía que utiliza, en comparación del 5% de las bombillas incandescentes (90% menos), y del 35% de la mayoría de las lámparas fluorescentes (30% menos). Por lo tanto, la iluminación por **LEDs** es preferida como fuente de luz muy eficiente en el consumo de energía, y además de muy compactos (hasta de 2 mm<sup>2</sup>), amigables del medio ambiente, que por no ser contaminantes pueden entonces ser completamente reciclados. Además, la reducción en el consumo de energía eléctrica ha representado una notable disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero.

### **La gran invasión de los LEDs blancos**

Actualmente, los **LEDs blancos** se encuentran en todas partes, desde las pantallas de nuestros teléfonos celulares, cuadros de mandos de los automóviles, anuncios publicitarios, computadoras portátiles, tabletas, televisores LCD (conocidos como televisores LED), hasta la iluminación pública, semáforos, faros delanteros de los automóviles, luz de navegación de los aviones e iluminación doméstica. De hecho, la Unión Europea está tratando de liderar la transición a fuentes de luz no contaminante, al dejar de comercializar las bombillas incandescentes desde el año 2012 y las bombillas de halógeno-tungsteno desde septiembre del 2018.

### **Tres tipos de luz blanca de los LEDs blancos**

Es importante notar que hay tres tipos de luz blanca, dependiendo de su **temperatura de color correlacionada (CCT**, por sus siglas en inglés) expresada en kelvin (K). La **CCT** de una fuente de luz

se define comparando su color de emisión con aquel de la luz que emitiría un cuerpo negro calentado a una temperatura determinada. Por lo tanto, la CCT no es realmente una medida de temperatura, dado que solo es una medida relativa. El cuerpo negro a temperatura ambiente (300 K) emite radiación en el infrarrojo, y emitirá radiación en una longitud de onda cada vez más corta conforme aumenta su temperatura, hasta emitir en el visible, en color rojizo, a 1000 K. Si el cuerpo negro continúa aumentando su temperatura, éste irá sumando los colores del espectro en su orden: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violeta. A una temperatura de 5780 K, la temperatura de la fotosfera solar (superficie del sol), el cuerpo negro emitirá en todo el espectro visible, generando luz blanca, y a partir de este momento irá sumando radiación ultravioleta. En la Fig. 2 se puede apreciar la CCT de la luz emitida por un cuerpo negro. Así, en astronomía es posible determinar la temperatura de una estrella. Las estrellas menos calientes tienden a ser rojizas y las más calientes tienden a ser azuladas.G



Figura 2. Temperatura de color correlacionada de la luz emitida por un cuerpo negro.



Figura 3. Luz Blanca Cálida vs Luz Blanca de Día.

De acuerdo a la temperatura de color existen 3 colores principales de luz blanca LED (ver Figura 2):

- **Blanco cálido** (2,200-3,900 K).
- **Blanco neutral o natural** (4,000-5,000 K).
- **Blanco frío o de día** (5000-7000 K).

En la Figura 3 se puede apreciar la diferencia entre la **luz blanca cálida** y la **luz blanca fría o de día**, donde las temperaturas de color de las bombillas LEDs en las lámparas son de **3,000** y **6,500 K**. Es importante mencionar que el tipo de luz blanca puede incidir sobre nuestro estado de ánimo, concentración y rendimiento, de modo que la luz blanca cálida es más recomendable para ambientes relajados y de descanso.

### Desarrollos recientes en la tecnología del LED blanco

Tomando como base la invención del **LED blanco** obtenido por el ingeniero **Nakamura**, mediante la combinación de **LED azul** con una capa de fósforo amarillo, recientemente, el **Dr. Ulises Caldiño**

(1960-) et al, de la Universidad Autónoma Metropolitana, lograron obtener emisión de **luz blanca fría (o de día) de 5250 K** a través de un fósforo vítreo de **fosfato de zinc activado con iones  $Ce^{3+}$  y  $Dy^{3+}$** , debido a la combinación de las emisiones azul (482 nm) y amarillo (573 nm) del  $Dy^{3+}$ , con excitación del fósforo en 280 nm (Caldiño, 2012). Esta longitud de onda de excitación en el cercano ultravioleta (NUV, por sus siglas en inglés) se puede obtener mediante un **LED (NUV) de nitruro de aluminio y galio (AlGaN)**. También se logró obtener **luz blanca cálida de 2700 K co-dopando con  $Mn^{2+}$**  el fosfato de zinc activado con  $Dy^{3+}$  y  $Ce^{3+}$ , con excitación del fósforo en 280 nm, debido a la emisión adicional roja (610 nm) del  $Mn^{2+}$  (Caldiño, 2012). El papel primordial del  $Ce^{3+}$  es ser un excelente sensibilizador de la radiación de 280 nm para los iones  $Dy^{3+}$  y  $Mn^{2+}$ . Figura 4 muestra una fotografía de la luz blanca de día y luz blanca cálida generadas por el fosfato de zinc activado con iones  $Ce^{3+}/Dy^{3+}$  y  $Ce^{3+}/Dy^{3+}/Mn^{2+}$ , respectivamente. Así, una nueva alternativa del **LED blanco** que está adquiriendo cada vez más interés, debido a su mayor flexibilidad y gran potencial de sintonizar

el color de emisión, es mediante el uso de un **fósforo para convertir la luz de un LED (NUV) a luz blanca**. Estos **LEDs blancos convertidos por un fósforo (pc-WLEDs por sus siglas en inglés)** han alcanzado una eficacia luminosa de 265 lm/W, la cual implica alrededor del triple de aquella (70-90 lm/W) de las lámparas fluorescentes (Narukawa, 2010).

### Conclusión

Podemos concluir que la **tecnología del LED** ha pasado de ser algo que no parecía tener ninguna aplicación práctica a ser la **opción más eficiente y ecológica para iluminar nuestro entorno**. Está transformando en todo el mundo la industria de la iluminación, y ha dado origen a una diversidad de aplicaciones en otros ámbitos, tal como el de los aparatos electrónicos. Recientemente la Real Academia de Ciencias de Suecia declaró: *Las bombillas incandescentes iluminaron el siglo XX, ahora las lámparas LED iluminarán el siglo XXI*. El dinamismo tecnológico y comercial actual de los **LEDs**, más eficientes, más duraderos y que no generan tanto calor como el que desprendían las bombillas incandescentes, sugiere que la fiesta

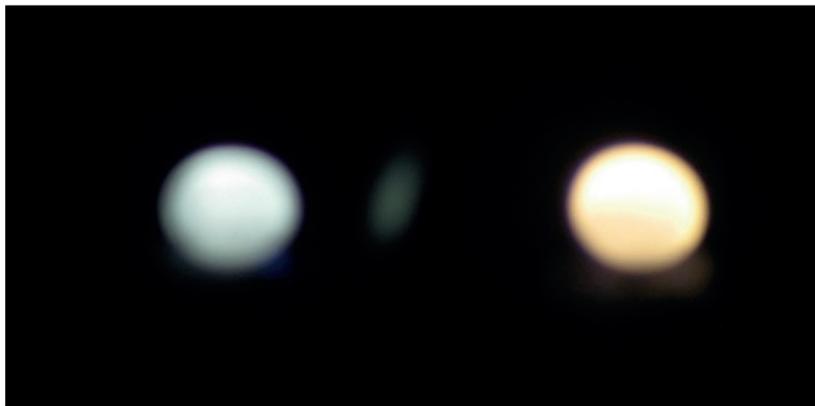


Figura 4. Generación de luz blanca de día de 5250 K (izquierda) y cálida de 2700 K (derecha) a través de fósforos vítreos de fosfato de zinc activados con  $Ce^{3+}/Dy^{3+}$ , y  $Ce^{3+}/Dy^{3+}/Mn^{2+}$ , respectivamente, bombeados con radiación NUV de 280 nm (LED de AlGaN).

está lejos de terminar, sino es que recién haya comenzado con uno de los mayores inventos de la historia de la tecnología con más de 50 años de vida.

### Referencias

Amano, H.; Kito, M.; Hiramatsu, K. y Akasaki, I., P-Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI), *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28[12], pp. L2112-L2114, 1989. doi:10.1143/jjap.28.l2112

Bando, K.; Sakano, K.; Noguchi, Y. y Shimizu, Y., Development of High-bright and Pure-white LED Lamps, *J. Light Vis. Environ.*, 22[1], pp. 2-5, 1998. doi.org/10.2150/jlve.22.1\_2

Caldiño, U.; Álvarez, E.; Speghini, A. y Bettinelli, M., Cold and warm white light generation using  $\text{Zn}(\text{PO}_3)_2$  glasses activated by  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$  and  $\text{Mn}^{2+}$ , *J. Lumin.*, 132, pp. 2077-2081, 2012. doi.org/10.1016/j.jlumin.2012.03.045

Holonyak, N. y Bevacqua, S.F., Coherent (visible) light emission from  $\text{Ga}(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)$  junctions, *Appl. Phys. Lett.*, 1[4], pp. 82-83, 1962. doi.org/10.1063/1.1753706

Nakamura, S.; Mukai, T. y Senoh, M. (1994), Candela-Class High-Brightness InGaN/AlGaN Double-Heterostructure Blue-Light-Emitting-Diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 64[13], pp. 1687-1689, 1994. doi:10.1063/1.111832

Narukawa, Y.; Ichikawa, M.; Sanga, D.; Sano, M. y Mukai, T., White light emitting diodes with super-high luminous efficacy, *J. Phys. D*, 43[35], 354002, 2010. doi:10.1088/0022-3727/43/35/354002

Round, H.J., A note on carborundum, *Electrical World*, 49, p. 309, 1907.

Sato, T. y Imai, M., Characteristics of Nitrogen-Doped GaAsP Light-Emitting Diodes, *Jpn. J. Appl. Phys.* 41[10R], 5995, 2002. doi: 10.1143/JJAP.41.5995

# Los gigantes del Pleistoceno mexicano: mamuts, mastodontes y gonfoterios

A large mammoth skull and tusk are displayed in a wooden structure. The skull is positioned in the center, with a large tusk extending upwards and to the left. The background consists of wooden beams and a staircase, suggesting a museum or a historical site. The lighting is dramatic, highlighting the texture of the bone and the wood.

**M. en C. Alberto Eduardo Barrañón-Salmón<sup>1</sup>**  
**Dr. César Antonio Ríos-Muñoz<sup>2</sup>**  
**M. en C. Deborah V. Espinosa-Martínez<sup>4,5</sup>**  
**Dr. Joaquín Arroyo-Cabrales<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> *Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México.*

<sup>2</sup> *Centro de Estudios Mexicanos UNAM-Costa Rica, Universidad Nacional Autónoma de México.*

<sup>4</sup> *Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.*

<sup>5</sup> *Laboratorio de Arqueozoología, Subdirección de Laboratorios y Apoyo Académico, Instituto Nacional de Antropología e Historia.*

## Resumen

Presentamos una revisión de las principales características anatómicas que definen a los proboscídeos mexicanos (mamuts, mastodontes y gonfoterios), con la finalidad de contar con información accesible y concreta que permita conocer las tres familias extintas que habitaron en lo que ahora es nuestro país: Elephantidae, Mammutidae y Gomphotheriidae, consideradas parte de la megafauna del Pleistoceno, periodo que abarcó desde 2.58–0.01 millones de años. Cada grupo se diferencia por las formas de sus molares, las defensas y el tamaño de sus cuerpos. Las causas de su extinción siguen debatiéndose, generando temas de investigación sobre la diversidad del pasado.

**Palabras clave:** Características morfológicas, Mamíferos del Cuaternario, Megafauna, México.

## Abstract

We present a review of the main anatomic characteristics which define Mexican proboscideans (Mammoths, mastodonts and gomphotheres). Our goal is to have accessible and concrete information that help to recognize the three extinct families that lived in what now is our country: Elephantidae, Mammutidae and Gomphotheriidae, which are considered part of the megafauna that lived in the Pleistocene, ranged from 2.58-0.01 million years. Each group is differentiated by the form of the molars, tusks, and the size of their bodies. The causes of their extinction are still under debate and have generated research topics about the past diversity.

**Keywords:** Morphological characteris-

tics, Quaternary mammals, Megafauna, Mexico.

## Introducción

El patrimonio paleontológico, definido como “el conjunto de bienes muebles (fósiles) e inmuebles (yacimientos) que son la evidencia del pasado geológico y biológico de una nación” (Aguilar-Arellano & Alvarado-Mendoza, 2021, p. 26), es increíblemente rico en México, y se enriquece con el descubrimiento de nuevas localidades fosilíferas, así como de nuevas especies y registros fósiles. Sin embargo, es innegable que existen grupos fósiles que son más llamativos, tales como los relacionados con la megafauna del Pleistoceno; es decir, todos aquellos animales que exceden los 44 kg, los cuales ya eran conocidos y valorados en nuestro país por los pueblos prehispánicos.

Algunos documentos de mediados del siglo XVI mencionan o describen esqueletos (o partes de estos) de gran tamaño, los cuales fueron identificados como restos de gigantes que habían poblado la Tierra, interpretación que dichos pueblos compartieron con los europeos. Estos fósiles fueron objeto de culto e incluso fueron utilizados con fines medicinales, y en la época de la Colonia como valiosas piezas de colección. Gracias al desarrollo de la anatomía comparada durante el siglo XVIII, estos restos de “gigantes” fueron reconocidos como los restos de animales de gran tamaño, comparables con la megafauna contemporánea (elefantes, rinocerontes o hipopótamos). Posteriormente, durante el siglo XIX, fueron referidos a “elefantes antiguos” los que hoy en día conocemos como mamuts, mastodontes y gonfoterios (López-Luján, 2020 [Figura 1]).

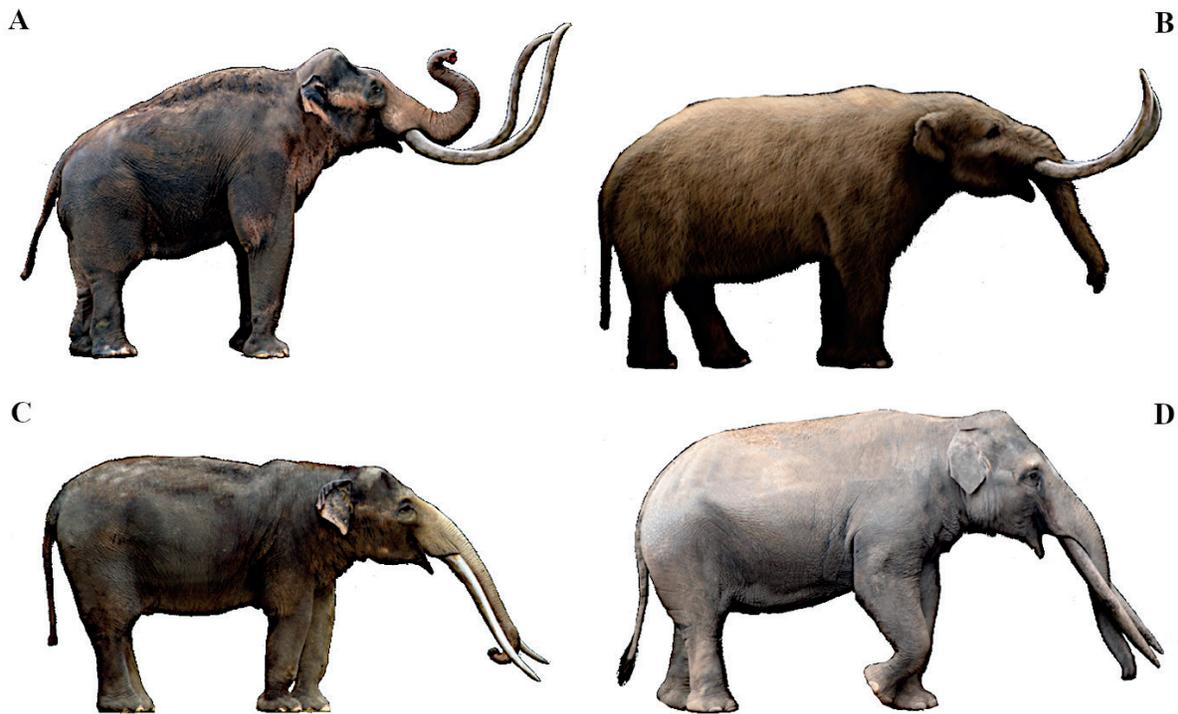


Figura 1. Reconstrucciones de los proboscídeos mexicanos del Pleistoceno (imágenes elaboradas por Sergio de la Rosa). A. Mamut colombino (*Mammuthus columbi*); B. Mastodonte americano (*Mammuthus americanum*); C. Gonfoterio de Cuvier (*Cuvieronius tropicus*); D. *Stegomastodon* (*Stegomastodon* sp.).

Es interesante ver cómo los restos de estos “elefantes antiguos”, que serán llamados proboscídeos de aquí en adelante, tuvieron relevancia cultural dentro de la sociedad de los antiguos pueblos prehispánicos, al igual que ocurre hoy en día con los elefantes actuales. ¿Y a qué se debe que este grupo de mamíferos, aparecido en África, haya sido y siga siendo tan atractivo para su estudio? Desde una perspectiva romanizada y muy conocida, los proboscídeos y el ser humano han mantenido una asociación que ha fascinado a muchos pueblos y culturas, desde que los antiguos grupos de cazadores humanos se alimentaban de estos gigantes pleistocénicos, jugando un papel importante en el ámbito económico como animal de trabajo u objeto de cacería, pasando por el artístico y el espiritual,

hasta el científico, donde ha sido un grupo de interés para biólogos, historiadores y antropólogos.

### Los proboscídeos, un orden particular de mamíferos

Actualmente, las especies de elefante africano de sabana (*Loxodonta africana*), de selva (*L. cyclotis*), y el asiático (*Elephas maximus*), son los únicos miembros sobrevivientes del Orden Proboscidea, del que se calcula han existido más de 175 especies, llegando a distribuirse por todos los continentes salvo la Antártida y Australia. Sólo tres familias y cuatro géneros habitaron México durante el Cuaternario (Pleistoceno y Holoceno): 1) Mammutidae, que comprende a los mastodontes (género *Mammuthus*), cuyo origen data del Oligoce-

no tardío y se extinguió hace 4500 años, 2) Gomphotheriidae, que incluye a los gonfoterios (géneros *Cuvieronius* y *Stegomastodon*), y existió desde el Mioceno temprano hasta el Pleistoceno tardío, y 3) Elephantidae, que engloba tanto a los mamuts (género *Mammuthus*) con un origen desde el Plioceno tardío hasta hace unos 8000 años, como a los elefantes actuales (géneros *Loxodonta* y *Elephas*) (Figura 2).

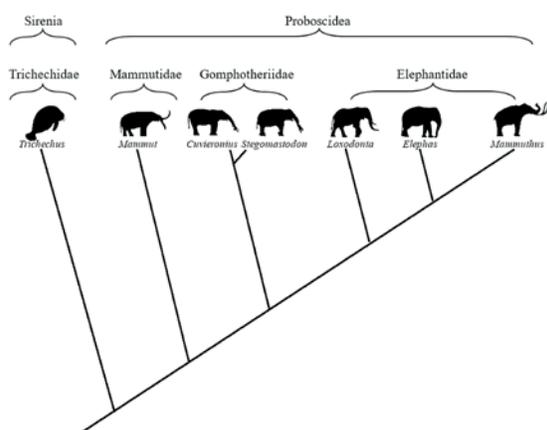


Figura 2. Relaciones filogenéticas de los géneros y familias de proboscídeos del Cuaternario y su grupo hermano, los sirénidos (manatíes y dugongos) [Imagen modificada de Shoshani et al. (2007)].

La anatomía y morfología de este grupo ha sido objeto de diversos estudios debido a las modificaciones y adaptaciones que desarrollaron estos animales como parte de su historia evolutiva, mismas que han sido ampliamente documentadas por zoólogos, como el especialista en este grupo, Jeheskel Shoshani (véase las lecturas recomendadas), las cuales coinciden que la característica más sobresaliente de este grupo de animales es la probóscide o trompa, miembro al cual debe su nombre este grupo, y que se formó por la fusión de la nariz con el labio superior, cumpliendo funciones respi-

ratorias, sensoriales, de comunicación y prensiles. Los estudios comparativos sugieren que todos los proboscídeos, actuales y extintos, presentan un hueco en la parte central del cráneo, que se asocia con la inserción de los músculos de la probóscide y un canal grande debajo de la órbita ocular que permite el paso de vasos sanguíneos hacia este apéndice. Sin embargo, en el caso de los primeros proboscídeos (cuyos primeros ancestros se calcula vivieron hace 58 millones de años [Ma]), la probóscide no estaba completamente formada, y fue hasta hace 38 Ma que aparecieron especies con una probóscide verdadera.

Otra característica distintiva del grupo es el gran tamaño de sus cuerpos que han presentado a lo largo de su historia evolutiva. Una prueba de esto es el elefante africano de sabana, considerado el animal terrestre más grande del mundo. Su gran tamaño ha provocado que los huesos de las extremidades sean más robustos y alargados, a modo de columnas, con una posición casi debajo del cuerpo y de manera vertical (locomoción graviportal). En el caso de sus cráneos, éstos son muy pesados y con grandes huecos llenos de aire para aligerar el peso, además de poseer un cuello muy corto.

Al igual que en otros mamíferos, los dientes de los proboscídeos tienen esmalte, dentina y cemento (tejidos mineralizados propios de los dientes que les brindan la dureza y resistencia para masticar, además de la fijación y adherencia a las mandíbulas y maxilas). Solo cuentan con 26 dientes en total (2 incisivos, 12 premolares y 12 molares) a diferencia de los 32 que tenemos los humanos (8 incisivos, 4 caninos o colmillos, 8 premolares y 12 molares). Por el gran tamaño

de sus premolares y molares (caracterizados por la presencia de estructuras alargadas que van de derecha a izquierda de manera repetida en la superficie masticatoria conocidas como lofos), no caben todos al mismo tiempo como en la dentadura del humano, por lo que a lo largo de su vida mudaran hasta 5 veces mediante un desplazamiento horizontal, en el que los dientes avanzan de atrás hacia adelante en lugar de abajo hacia arriba. Así, las piezas más jóvenes se hallan en la parte de atrás, y las más viejas y desgastadas están hasta adelante, de donde se van cayendo. Nótese que en el conteo total de dientes no existen colmillos; entonces, ¿qué son los mal llamados “colmillos” del elefante? En realidad son los incisivos modificados, cuyo nombre correcto es defensas, compuestos principalmente de dentina (algunos grupos fósiles tienen una banda de esmalte), y con un crecimiento continuo a lo largo de la vida del animal.

Así, las diferencias entre los proboscídeos fósiles están dadas principalmente por la forma del cráneo, las defensas y los molares (Figura 3). De estos últimos, se considera el número de lofos, y los patrones oclusales (formas que adquieren las cúspides de los molares al desgastarse durante la masticación), y que son características únicas para los proboscídeos, lo que les permite a los paleontólogos identificar y clasificar con mayor seguridad los restos de estos animales.

**Los emblemas de la prehistoria:  
el mamut colombino  
(*Mammuthus columbi*) y  
el mastodonte americano  
(*Mamut americanum*)**

Las figuras del mamut y el mastodonte son, quizás, los proboscídeos más conocidos y

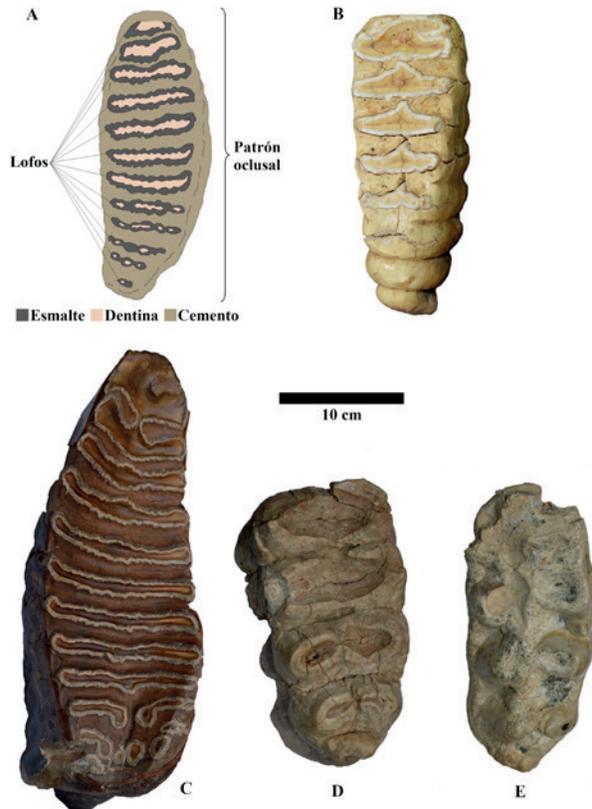


Figura 3. Terceros molares inferiores de proboscídeos (Esquema basado en Shoshani (1996). Fotografías originales de Autor 1). A. Esquema general del molar de proboscídeo. B. Elefante asiático (*Elephas maximus*). C. Mamut colombino (*Mammuthus columbi*). D. Mastodonte americano (*Mammut americanum*). E. Gonfoterio (*Cuvieronius* sp.).

retratados en la cultura popular. Famosos también por sus restos congelados en las zonas más frías de América y Asia (Alaska, Canadá y Siberia), y que, a diferencia de México, su latitud permite las condiciones idóneas para la preservación por congelación. No obstante, los restos de estos organismos se encuentran ampliamente distribuidos a lo largo del territorio nacional, hallándose desde un solo individuo hasta cientos de ellos, como ocurre en el área que comprende la Cuenca de México (p. ej., el yacimiento de Santa Lucía, Estado de México).

Ahora bien, ¿cómo se diferencian los mamuts de los mastodontes? Primero, por su tamaño, aunque ambos pertenecen a la megafauna, se estima que el mamut era más grande que el mastodonte, con una altura al hombro poco mayor a los cuatro metros, en cambio la del mastodonte apenas excedía los tres metros. Sin embargo, sus dimensiones no son definitivas para la distinción entre ambos, puesto que puede ocurrir que éstas se sobrepongan entre especies. Ahora, al pertenecer las dos especies a familias diferentes (Elephantidae y Mammutidae, respectivamente), existen características únicas para ambas especies. No obstante, algunos investigadores señalan que las diferencias morfológicas entre ambos grupos son mínimas, salvo que se tengan a la vista especímenes de uno y otro al mismo tiempo (Hodgson *et al.*, 2008). En términos generales del cuerpo, se concluye que el mastodonte es mucho más bajo, alargado y fornido que el mamut, el cual se caracteriza por presentar huesos mucho más alargados y esbeltos (Hodgson *et al.*, 2008). Otra diferencia reconocible en sus esqueletos es la forma de la columna vertebral, la cual pareciera estar jorobada en el mamut e inclinada abruptamente hacia su final, mientras que en el mastodonte, la columna vertebral se observa como una curva cóncava (Hodgson *et al.*, 2008).

Si bien no hay muchas diferencias esqueléticas y las que existen son poco marcadas, las que se presentan en sus cráneos y en sus dentaduras son decisivas para identificarlos. El cráneo del mastodonte es más aplanado, alargado y ancho; mientras que el del mamut se diferencia principalmente por ser más abombado en su parte posterior (Hodgson *et al.*, 2008; Green, 2002). Las defensas también son bastante diferentes. Aunque ninguno de los dos presenta una banda de esmalte como se observa

en los gonfoterios, las defensas del mamut se curvan muy pronunciadamente y en ocasiones llegan a cruzarse entre sí, mientras que en el mastodonte son alargadas y se curvan hacia arriba.

En cuanto a los molares, éstos son completamente diferentes. En el mamut, dado que pertenece junto con el elefante actual a la Familia Elephantidae, ambos comparten la misma morfología en sus molares: presentan un aspecto de bandas transversales alargadas de esmalte rodeadas por el cemento dental, las cuales se denominan lamelas o láminas, cuyo número, utilizado para la identificación taxonómica, varía entre las diferentes especies de mamut, y que en el caso del mamut columbino, su número oscila entre 17 y 22 láminas (Carbot-Chanona *et al.*, 2017).

En el caso del mastodonte, sus molares tienen una forma trapezoidal y en la superficie oclusal o masticatoria presentan un surco que separa las cúspides presentes en cada lofo, cuyo número oscila entre los cuatro y cinco. Estas cúspides, al no estar todavía desgastadas por la masticación del alimento, se observan como crestas, similares a una sierra, más o menos redondeadas, además, carecen de cúspides accesorias de pequeño tamaño entre los valles. Cuando el diente sufre desgaste, estas crestas comienzan a limarse, por lo que se observan patrones oclusales de aspecto simple, es decir, no presentan proyecciones o formas complicadas (Green, 2002; Bravo-Cuevas *et al.*, 2015).

### **Los gonfoterios, unos proboscídeos poco conocidos**

A diferencia de sus demás primos, la Familia Gomphotheriidae es poco conocida fuera del ámbito académico, a pesar de que este grupo también goza de una am-



Figura 4. Defensas de mamut colombino (A) y de gonfoterio (B) [Fotografías originales de Autor 1].

plia distribución tanto en el país como en el continente; muy probablemente esto se debe a que sus restos fueron confundidos con los del mastodonte, y no fue hasta las nuevas revisiones y análisis de estos fósiles por parte de los paleontólogos que se identificaron a estos “mastodontes sureños” como gonfoterios.

Entonces, ¿qué llevó a que los gonfoterios hayan sido confundidos con los mastodontes? Para empezar, su tamaño similar al del mastodonte y al del elefante actual (unos 3 metros a la altura del hombro). También sus molares, que a primera vista son muy parecidos a los del mastodonte, aunque al examinarse a profundidad se pueden observar las diferencias. Por ejemplo, los molares de los gonfoterios son mucho más alargados que anchos, lo que les confiere un aspecto rectangular. El número de lofos también varía entre las especies. En el gonfoterio *Cuvieronius* se presentan entre 4 ½ a 5 ½, mientras que en *Stegomastodon* de 5 a 5 ½

(Alberdi & Corona-Martínez, 2005; Alberdi *et al.*, 2009). Además, los lofos sin desgastar son más redondeados y de aspecto bulboso, muy diferentes a las características crestas del mastodonte que recuerdan a una sierra, y que al desgastarse por la masticación, su esmalte adquiere un característico patrón oclusal que recuerda a un trébol; aunque hay algunos que llegan a presentar patrones bastante complejos (Alberdi & Corona-Martínez, 2005; Alberdi *et al.*, 2009; Tapia-Ramírez *et al.*, 2013). Lo que hace que este patrón sea único para esta familia.

Con respecto a las defensas, éstas son bastante largas; aunque, a diferencia de los otros proboscídeos, son casi completamente rectas o se curvan muy ligeramente (Figura 4). Además, tienen una banda de esmalte a lo largo de todo el diente, la cual ha desaparecido completamente en los otros proboscídeos. En el cuadro 1 se presenta un resumen de las diferencias entre estas tres familias.

<b>Características</b>	<b>Mamuts (<i>Mammuthus</i>)</b>	<b>Mastodontes (<i>Mammot</i>)</b>	<b>Gonfoterios (<i>Cuvieronius</i> y <i>Stegomastodon</i>)</b>
<b>Altura al hombro</b>	4 m o más	3 m o más	3 m
<b>Cuerpo</b>	Huesos alargados y esbeltos	Bajo, alargado y fornido	Robustos
<b>Cráneo</b>	Redondeado, parece un domo en su parte posterior	Aplanado, alargado y ancho	Cortos y altos, ligeramente aplanados y anchos
<b>Defensas superiores</b>	Sí	Sí	Sí
<b>Defensas inferiores</b>	No	A veces, pero muy reducidas	A veces, pero muy reducidas
<b>Forma de las defensas</b>	Alargadas y muy curvadas	Alargadas y curvadas hacia arriba	Alargadas, rectas o ligeramente curvadas
<b>Defensas entrecruzadas</b>	Sí	No	No
<b>Defensas con bandas de esmalte</b>	No	No	Sí
<b>Forma de los molares</b>	Alargados, parecidos al elefante actual	Trapezoidales	Rectangulares
<b>Lofos a modo de bandas horizontales</b>	Sí	No	No
<b>Lofos parecidos a crestas redondeadas</b>	No	Sí	Sí
<b>Patrones oclusales simples</b>	Sí	Sí	No
<b>Patrones oclusales complejos o parecidos a un trébol</b>	No	No	Sí
<b>Molares con cúspides accesorias</b>	No	No	Sí
<b>Número de lofos en terceros molares</b>	17-22	4-5	4 ½-5 ½

*Tabla 1. Resumen de las características distintivas de los proboscídeos pleistocénicos de México.*

Nótese la marcada curvatura en la del mamut y la forma recta y suave curvatura en la del gonfoterio.

### Importancia de su estudio

Como se mencionó anteriormente, no existen en México las condiciones idóneas para la preservación por congelación, por lo que el estudio de estos grupos fósiles se realiza a partir de los restos permineralizados o petrificados, por lo que las investigaciones basadas en compuestos orgánicos (ADN o colágeno) recuperados de ellos pueden verse limitadas. En el caso de los proboscídeos, el amplio número de localidades y yacimientos en el país, que pueden contar con un gran número de sus osamentas, y la existencia de miembros actuales, favorece su estudio.

Los últimos yacimientos descubiertos y con abundante material de este grupo en el territorio nacional, junto con la aplicación de herramientas moleculares y biogeoquímicas son fundamentales para abordar diversos aspectos sobre este grupo. Sin embargo, todavía existen factores que ponen en riesgo las localidades fosilíferas (p. ej., la industrialización, el vandalismo o recolecta ilegal) por lo que su preservación requiere atención inmediata en nuestro país.

### Conclusiones

Mamuts, mastodontes y gonfoterios existieron en lo que hoy es México. A pesar de que se trata de grupos extintos, es posible que a través de su estudio podamos saber cómo respondieron a eventos pasados, como los cambios en el clima, las erupciones volcánicas y la expansión de los seres humanos, eventos que afectan a las especies actuales.

El trabajo con grupos que no se encuentran vivos en la actualidad es un reto; los avances

científicos y tecnológicos de hoy permiten analizarlos bajo enfoques que no existían en el pasado. Estas nuevas herramientas permiten contestar preguntas evolutivas, biogeográficas y ecológicas que actualizan el conocimiento de los grupos fósiles y pueden llegar a ser clave en el entendimiento de los grupos y biotas actuales. Aspectos como el número de especies reconocidas, los hábitos alimenticios, conducta social, dinámica poblacional, causas de su extinción, son solo algunos de los temas que siguen siendo abordados por diferentes grupos de trabajo.

### Agradecimientos

Agradecemos a los árbitros de la revista por su apoyo en la mejora de este manuscrito. Al INAH y al Departamento de Morfología de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM por el permiso para tomar las fotografías aquí presentadas. A Sergio de la Rosa por las ilustraciones de las reconstrucciones de proboscídeos usadas en este trabajo. Reconocemos el apoyo de CONACYT a través del proyecto de Ciencias de Frontera, titulado “De las Especies a los Genes: Diversidad de los mamíferos del Cuaternario en México y su implicación en la conservación antropogenética” (proyecto 2574557 Ciencia de Fronteras 2019).

### Referencias

- Aguilar-Arellano, F. J. y Alvarado-Mendoza, L., Consejo de Paleontología del INAH: Una nueva etapa, *Arqueología Mexicana*, 28[170], pp. 26–29, 2021.
- Alberdi, M. T., y Corona-Martínez, E., Revisión de los gonfoterios en el Cenozoico tardío de México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22[2], pp. 246–260, 2005.
- Alberdi, M. T., Juárez-Wo, J., Polaco, O. J., y Arroyo-Cabral, J., Description of the most

complete skeleton of *Stegomastodon* (Mammalia, Gomphotheriidae) recorded for the Mexican Late Pleistocene, *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, 251[2], pp. 239–255, 2009.

Bravo-Cuevas, V. M., Morales-García, N. M., y Cabral-Perdomo, M. A., Description of mastodons (*Mammot americanum*) from the late Pleistocene of southeastern Hidalgo, central Mexico, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67[2], pp. 337–347, 2015.

Carbot-Chanona, G., Lagunas-Rodríguez, Z., Jiménez-Moreno, F. J., y Suárez, S., Aspectos paleobiológicos de dos ejemplares de *Mammuthus columbi* (Mammalia, Proboscidea, Elephantidae) del Pleistoceno de Puebla, centro de México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69[3], pp. 591–609, 2017.

Green, J. L., *Mammot americanum* (Kerr, 1792), *Fossil Species of Florida*, 1, pp. 1–11, 2002.

Hodgson, J. A., Allmon, W. D., Nester, P. L., Sherpa, J. M., y Chiment, J. J., Comparative osteology of Late Pleistocene mammoth and mastodon remains from the Watkins Glen Site, Chemung County, New York, *Palaeontographica Americana*, 61, pp. 301–367, 2008.

López-Luján, L., Mamuts, gigantes y elefantes en la Nueva España: Los orígenes mexicanos de la paleontología de vertebrados, *Arqueología Mexicana*, 28[163], pp. 14–23, 2020.

Shoshani, J., Ferretti, M. P., Lister, A. M., Agenbroad, L. D., Saegusa, H., Mol,

D., y Takahashi, K., Relationships within Elephantinae using hyoid characters, *Quaternary International*, 169–170, pp. 174–185, 2007.

Tapia-Ramírez, G., Guzmán, A. F., y Polaco, O. J., Los gonfoterios (Proboscidea, Gomphotheriidae) de Colima, México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65[3], pp. 591–607, 2013.

### Lecturas recomendadas

Arroyo-Cabrales, J., Polaco, O. J., Laurito, C., Johnson, E., Alberdi, M. T., y Valerio, Z. A. L., The proboscideans (Mammalia) from Mesoamerica, *Quaternary International*, 169–170[Spec. Iss.], pp. 17–23, 2007.

Arroyo-Cabrales, J., Polaco, O. J., Johnson, E., y Ferrusquía-Villafranca, I., A perspective on mammal biodiversity and zoogeography in the Late Pleistocene of México, *Quaternary International*, 212[2], pp. 187–197, 2010.

Sanders, W., Horizontal tooth displacement and premolar occurrence in elephants and other elephantiform proboscideans, *Historical Biology*, 30[1–2], pp. 137–156, 2018.

Shoshani, J., Skeletal and other basic anatomical features of elephants, En J. Shoshani y P. Tassy (Eds.), *The Proboscidea. Evolution and Palaeoecology of elephants and Their Relatives*, Oxford University Press, 1996, pp. 9–20.

Shoshani, J., Understanding proboscidean evolution: a formidable task, *TREE*, 13[12], pp. 480–487, 1998.

# **Polímeros inteligentes: Diseño y Estrategias**

## ***Smart Polymers: Design and Strategies***

**Dra. Catalina Haro-Pérez**

**Dr. Eduardo Basurto**

**Mtro. Carlos A. Vargas**

**Dr. Gerardo Odriozola**

**Área de Física de Procesos Irreversibles.**

**División de Ciencias Básicas e Ingeniería,**

**Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco**

**Resumen:**

En este artículo de divulgación se pretende resumir de forma asequible la información bibliográfica existente y referente a los polímeros inteligentes y sus últimos avances. Se abarca desde polímeros emisores de luz hasta aquellos sensibles a su entorno, pasando por polímeros autorreparables.

**Palabras clave:** polímeros, polímeros inteligentes, materiales inteligentes.

**Abstract:**

This review pretends to affordably summarize the existing bibliography on smart polymers and give a glance at the last advances. We cover from light emitting polymers to responsive ones, passing through self-healing polymers.

**Keywords:** polymers, smart polymers, smart materials.

### 1. Introducción: la definición e Wikipedia de un concepto complicado

Los polímeros inteligentes (del inglés, *smart polymers*) pertenecen a la familia de los materiales que llevan el mismo calificativo, materiales inteligentes. Y el lector podría preguntarse: ¿De verdad?, ¿un material puede ser inteligente? La respuesta es un rotundo no. Digamos que es una licencia literaria (por no decir exageración o mentira) que se tomó algún grupo de investigadores que, como tantas otras cosas, terminó por contagiarse a otros y, al final, con el tiempo, muchos o casi todos terminaron por aceptar<sup>1</sup>. El diccionario de la lengua española de la RAE (Real Academia Española) define a la inteligencia

como *la capacidad de entender o comprender, la capacidad de resolver problemas, la habilidad y destreza ganadas con la experiencia*, entre otras acepciones donde se da a entender que se trata de una capacidad humana, o al menos de algún tipo de vida, y si quisiéramos forzar un poco las cosas, de una máquina. Algo similar ocurre en inglés, donde *smart* se define como *having or showing a quick-witted intelligence*, que se podría traducir como algo más que ser inteligente, ... ser listo (ver Figura 1).



Figura 1. Conversación casual entre dos materiales inteligentes.

Ante semejante respuesta, el lector podría preguntar – ¿Por qué exageran los investigadores? y ¿a qué se refieren con material inteligente? – Respondamos a la segunda y dejemos de lado a la primera por complicada. Según Wikipedia se consideran inteligentes los materiales que son capaces de cambiar alguna o varias de sus propiedades de forma significativa y controlada como respuesta a algún estímulo de su entorno. Los estímulos del entorno pueden ser de diferente tipo y estilo, como la presencia o ausencia de luz, cambios en la

<sup>1</sup> Los científicos no son tan diferentes al resto de los humanos incluyendo a matemáticos y físicos teóricos (lo que ya es mucho decir).

humedad, de temperatura, pH, presencia de algún compuesto químico, o exposición al estrés mecánico. Esta definición podría no dejar satisfecho al lector, que podría continuar con argumentos como: – ¿y eso qué?, la interacción con el entorno siempre puede cambiar una propiedad de lo que se esté estudiando. Por ejemplo, el impulso de la fuerza neta externa es igual al cambio de la cantidad de momento lineal de mi sistema. ¿Quiere decir esto que cualquier sistema con masa es inteligente? – No, ... bueno, se supone que estamos excluyendo la respuesta del sistema como un todo a una fuerza externa. Los cambios de posición o velocidad del centro de masa del sistema no cuentan. Por ejemplo, un material inteligente podría ser un sensor de la presencia de un compuesto químico, o un material que muestre una modificación en su estructura molecular debido a un cambio de temperatura. Pero el lector también podría argüir: – sigo sin verlo claro, si la temperatura de los alrededores se incrementa, el volumen del gas ideal contenido en un recipiente que se encuentra en equilibrio térmico aumenta. De hecho, un gas cercano a la idealidad puede usarse como termómetro a presión o volumen constante, y la llamada escala del gas ideal es equivalente a la escala de temperatura absoluta. ¿Quiere decir esto que un gas ideal es un material inteligente? – ¡Otra vez, no! El gas ideal, o cualquier gas real cercano a la condición ideal (a baja presión), no se considera inteligente. De hecho, se trata del modelo más simple que existe para describir a un material (en este caso a un gas). Ahora, estrictamente, tienes razón; difícilmente un material no responde para nada a cambios del entorno. Quizás la cla-

ve de la definición que nos da Wikipedia<sup>2</sup> se encuentra en de *forma significativa y controlada* (aunque el gas ideal cambia significativamente su volumen con la presión a temperatura constante y también se puede controlar) o quizás la definición de material inteligente debiera incluir algo como de *forma anómala* (aunque habría que dejar claro a qué nos referimos con esto). Es que, sin ver unos ejemplos concretos, la definición queda muy en el aire; y, la verdad, hay que aceptar que tal como se presenta puede parecer un poco turbia. Al final, quizás nos habría convenido más el haber intentado responder a la primera pregunta.

Pero volviendo al tema que nos concierne, los ejemplos típicos de materiales considerados inteligentes incluyen a los piezoeléctricos (sólidos que producen electricidad al ser sometidos a estrés y son utilizados para controlar el movimiento de máquinas que requieren de mucha precisión), materiales que presentan memoria de forma (pueden recobrar su forma original después de ser sometidos a estrés o cambios de temperatura), materiales que convierten la luz en electricidad (con aplicación en paneles solares y optoelectrónica en general), materiales cromogénicos (aquellos que cambian su color como respuesta a un estímulo externo), fotomecánicos (cambio de forma por exposición a la luz), termoelectrónicos (generan electricidad como respuesta a un gradiente de temperatura) y nuestros polímeros inteligentes, entre varios otros.

## 2. Polímeros inteligentes

Efectivamente, hay materiales poliméricos que se consideran inteligentes, y no

<sup>2</sup> A Wikipedia la hacemos todos. Aquí estamos argumentando en contra de esta definición en particular, pero nada nos detiene de sugerir cambios para, a través del debate, intentar mejorarla.

son pocos. Para comenzar, habrá que introducir primero a los polímeros. La palabra polímero deriva del griego y resulta de la conjunción de *polus* (muchos) y *meros* (partes). La idea es que su estructura química se enlaza a muchas unidades que pueden ser idénticas, en caso de los llamados homopolímeros, o diferentes, los copolímeros. La naturaleza ha inventado estas muy largas cadenas moleculares mucho antes de que nosotros fuésemos conscientes de su existencia (de hecho, desde mucho antes de que existiéramos). Algunos polímeros naturales como el ADN (ácido desoxirribonucleico), el ARN (ácido ribonucleico), y las proteínas son, de hecho, la base de la vida. Sin embargo, cuando uno habla de materiales poliméricos se tiende a pensar en materiales sintetizados por nosotros, los humanos. Posiblemente esto tenga que ver con el hecho de que los polímeros sintéticos son relativamente nuevos. Fue en 1920 cuando Staudinger publicó su artículo *Über Polymerisation* [Staudinger, 1920] sobre la polimerización, por el que recibió su premio Nobel en 1953, detonando el uso de los polímeros sintéticos en nuestra vida diaria. Desde su invención, nos hemos vuelto totalmente dependientes de éstos. Hoy los plásticos, las gomas, y las fibras sintéticas de todo tipo y estilo son parte de nuestro día a día. La humanidad hizo uso de los polímeros naturales desde que tenemos memoria. El humano que le haya quitado la piel a un animal para hacerse un abrigo, o quien haya trenzado juncos para hacer una cuerda podría haber sido el primero. Luego habríamos aprendido a utilizar la lana, el algodón y el lino para hacer prendas y otras cosas. La celulosa (un polímero de origen vegetal) jugó un papel crucial en la industria del papel desde sus orígenes, y los Olmecas, Mayas y Aztecas hicieron uso del caucho natural para hacer pelotas

y tejidos impermeables. La primera manipulación química de los polímeros llegó con la patente de Goodyear en 1839, que convertiría a un material plástico (el caucho natural) en goma. Como el lector bien sabrá, la respuesta a un esfuerzo de tensión brindada por un plástico y una goma difieren significativamente, uno se deforma permanentemente, y el otro regresa a su estado original una vez que el esfuerzo desaparece. Esto se debe a que las cadenas poliméricas del caucho natural se entrecruzan (se enlazan covalentemente) durante el proceso de vulcanización, lo que le confiere memoria de forma al material. La vulcanización expandió inmensamente el número de aplicaciones del caucho natural, siendo la fabricación de suelas de zapatos y las llantas de automóviles algunos de sus éxitos más icónicos. Otro punto de inflexión ocurrió con la invención del Nylon y su uso en la industria textil. Por último, el desarrollo y el aún mayor número de aplicaciones de los polímeros sintéticos revolucionaron nuestro estilo de vida. Desde las bolsas de supermercado, los popotes, y las botellas de PVC (policloruro de vinilo) y de PET, (poli tereftalato de etileno) que se acumulan en los océanos conformando el 80% de su contaminación, pasando por ropa deportiva, y terminando con las piezas del teclado con los que transferimos esta información, fueron sintetizadas por los humanos a partir de monómeros.

Ahora, el mismo lector del apartado anterior bien podría señalar que si son tan utilizados y omnipresentes, – ¿qué hace ahora la diferencia con esto de su supuesta inteligencia? – ¡Aaah!, ésta es justo la pregunta que intentamos responder aquí. Ocurre que tradicionalmente se los ha diseñado para que presenten ciertas propiedades estáticas, digamos, y ahora se pretende que respondan, que cambien, que



ser infrarroja, visible, o ultravioleta. Los primeros LED fueron de baja intensidad y se han utilizado como indicadores en circuitos eléctricos. Los LED son esas luces pequeñas y generalmente rojas que suelen estar en el panel frontal de la tele (u otro equipo electrónico) y que se utilizan para indicar que está encendida. Dado que estos dispositivos producen luz de una longitud de onda específica, fue todo un reto conseguir luz blanca (luz que contiene todo el espectro visible) y, más aun, hacer que tuviera la intensidad necesaria para sustituir otros tipos de iluminación [Dutta, 2018]. Esto se logró con una combinación de emisión de generación de alta intensidad y fluorescencia lograda con el uso de varios tipos diferentes de fósforo. Hoy, los LED han remplazado a los bulbos incandescentes dada su mucho mayor eficiencia (mayor cantidad de lumen/W) y menor costo. Además, se ha visto que la iluminación LED no está restringida a materiales inorgánicos, sino que también varias moléculas orgánicas pueden emitir luz. A los LED que hacen uso de un emisor orgánico se les conoce como OLED, y ya son varios los dispositivos que los usan (monitores, pantallas de celulares, y también televisores de muchas pulgadas de longitud diagonal de la pantalla). El material orgánico puede tratarse de pequeñas moléculas arregladas de forma cristalina o, adivinen qué, polímeros orgánicos (PLED).

Los PLED pueden ser homopolímeros o no, pero tienen en común que sus unidades monoméricas suelen ser relativamente complejas y formadas por varias estructuras aromáticas. Se fabrican depositando una capa muy delgada del polímero sobre un ánodo transparente y colocando un cátodo metálico en contacto por el otro lado,

haciendo que el material polimérico se encuentre en medio. Se trata de una tecnología con el potencial de ser más económica que la de los LED tradicionales, dado que su producción no involucra el uso de altos vacíos (para evitar impurezas) y su deposición se puede realizar usando técnicas de impresión bien desarrolladas. Otra de las ventajas es que permite hacer flexibles e incluso transparentes a las pantallas. Esto podría, llevando las cosas al extremo de la imaginación (o quizás no tanto), hacernos ver cosas que no están ahí, o hacer que no viéramos cosas que realmente sí están. Uno podría vestirse con ropa emisora de luz que justo emitiera hacia delante la luz que llega a nuestras espaldas, y hacia nuestra espalda la luz que nos llega desde en frente. Si alguien nos viese de frente o de espalda, vería llegar justo los fotones que habría visto si no estuviéramos ahí (ser invisibles). También podríamos hacer que nuestras ventanas mostraran actividad y movimiento en una casa vacía. De hecho, podríamos ... bueno, podríamos hacer de todo un poco<sup>3</sup>.

La mayor dificultad de esta tecnología se encuentra en lo que se conoce como corrimiento del color que aparece como consecuencia de los diferentes tiempos de degradación de los polímeros. Resulta que aquellos que son capaces de emitir tonos de azul se degradan antes que los que iluminan en la región roja y verde del espectro visible. Esto hace que las pantallas pierdan los azules con el tiempo y, por consiguiente, iluminen de forma más cálida conforme pasa el tiempo, como cuando se enciende la *luz nocturna* de la pantalla de la *laptop* que, dicen, cuida nuestra vista.

## 2.2 Polímeros fotovoltaicos

Para evitar el corrimiento del color, se trata

<sup>3</sup> Sería el fin de la magia, porque cuando todos seamos magos ... nadie lo será.

de ir a la inversa: generar energía eléctrica (corriente continua) a partir de radiación electromagnética utilizando materiales poliméricos [Ameri, 2009]. Dependiendo del sistema, se puede convertir luz del espectro infrarrojo, ultravioleta, o visible, en corriente continua, utilizando celdas basadas en polímeros. Los polímeros empleados tienen en común estructuras que poseen varios enlaces conjugados, donde los átomos forman enlaces covalentes simples y dobles de forma alternada (estructuras resonantes). Los orbitales p dirigidos perpendicularmente a los enlaces covalentes dan lugar a los llamados enlaces tipo pi, orbital ocupado de mayor energía, y su correspondiente orbital antienlace  $\pi^*$ , orbital desocupado de menor energía. Así, la diferencia de energía entre estos orbitales se asemeja a la banda prohibida energética de un semiconductor inorgánico convencional. Una vez que se absorbe un fotón, se genera un estado excitado localizado en la región molecular donde se ha producido la absorción. Este estado tiene acoplados electrostáticamente al electrón excitado y al hueco generado, que pueden recombinarse. Para separarlos, evitar el decaimiento del estado excitado, transportarlos a los electrodos y estos fuera de la celda para realizar trabajo y regresar por su lado opuesto, es necesario otro tipo de material que sea capaz de aceptar electrones. Este material puede ser, por ejemplo, un fullereno, que se torna en un radical aniónico cada vez que acepta un electrón [Nelson, 2011]. Estos aniones luego transfieren su carga al cátodo, mientras que los huecos se dirigen al ánodo.

### 2.3 Polímeros cromogénicos

El cromismo<sup>4</sup>, un proceso por el cual se

induce un cambio reversible en el color de un compuesto, se encuentra vinculado a un cambio en los estados electrónicos de un material, generalmente asociado a enlaces pi o d [Ferrara, 2014]. Entonces, el ambiente debe estimular estos cambios en la densidad electrónica de la sustancia en cuestión. Se conocen muchas sustancias cromogénicas naturales y también se han sintetizado otras. El cromismo puede clasificarse de acuerdo con el estímulo que lo genera, puede ser térmico (dando lugar al termocromismo), lumínico (fotocromismo), eléctrico (electrocromismo), o provocado por el solvente (solvatocromismo). Hace unos años se pusieron de moda unas playeras que cambian de color con la temperatura. Hoy hay otras que cambian de color con la exposición al sol. Los colorantes utilizados sufren justamente de termocromismo y fotocromismo, respectivamente. Si a ese tipo de colorantes los pudiésemos polimerizar<sup>5</sup> sin perder este efecto, entonces tendríamos polímeros termocrómicos y fotocromáticos que, a diferencia del colorante, serían moléculas extremadamente grandes con todas las propiedades mecánicas que esto conlleva.

### 2.4 Polímeros capaces de repararse por sí mismos

Deje el lector que les llamemos autocurables<sup>6</sup> aunque no exista la palabra. Los investigadores se refieren a este tipo de materiales cuando presentan la capacidad de autorreparar algún daño sin la intervención humana [Ghosh, 2008]. En general, los materiales, incluidos los plásticos y las gomas, se degradan con el tiempo debido a lo que se conoce como fatiga y desgaste.

<sup>4</sup> Nos inventamos esta palabra como traducción del inglés *chromism*, que sí existe (a veces es cómodo hacer estas barbaridades, lo sentimos). El término cromogénico sí existe, y quiere decir que *origina color*.

<sup>5</sup> No es posible polimerizar monómeros covalentemente sin cambiar su estructura química.

<sup>6</sup> Otra palabra inventada. Es que es muy engorroso repetir *capaces de repararse por sí mismos* una y otra vez.

También se pueden degradar por su exposición al ambiente (oxidación), o por sufrir algún accidente o mal uso. La aparición de fracturas microscópicas puede alterar de forma importante sus propiedades mecánicas, eléctricas, o acústicas, y la propagación de las fracturas termina con la ruptura del material. Estas microfracturas son el resultado de rupturas de enlaces localizados en la misma área. Dado que las microfracturas son difíciles de detectar, muchas veces el material falla sin previo aviso y esto puede, en algunos casos, producir daños materiales o humanos. Los materiales autocurables pueden reparar sus microfracturas e incluso las fracturas más grandes y así evitar que éstas se multipliquen para producir fallas. Existen dos estrategias para lograr el autocurado de los materiales poliméricos: la intrínseca y la extrínseca [Yang, 2013; Mahajan, 2019]. La primera se basa en la reversibilidad de los enlaces que conforman a los polímeros. Aquí la idea es que bajo ciertas condiciones de estrés o temperatura los enlaces se rompen, pero estos se vuelven a formar en condiciones de temperatura o niveles de estrés menores. En este caso, los monómeros que dan lugar a los polímeros son capaces de repolimerizarse. La estrategia extrínseca separa al material polimérico del agente químico que repara el daño, el cual se confina en microcápsulas o en canales capilares que pueden o no formar una red interconectada, para ser liberado por la misma acción mecánica que produce el desgarre.

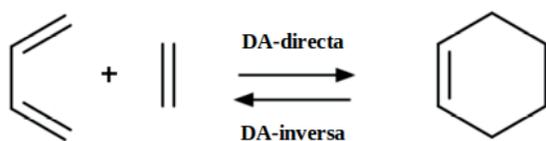


Figura 3. Ejemplo simple de la reacción de Diels-Alder directa e inversa.

Veamos algunos ejemplos de los que siguen la primera estrategia. Para ello es necesario tener presente el tipo de ruptura que se pretende restablecer. La ruptura de los enlaces covalentes puede ser homolítica (cada átomo del enlace roto se lleva un electrón de forma simétrica) o heterolítica (uno se lleva un electrón y el otro no, rompiendo la simetría). Para los polímeros generados a partir de la reacción de Diels-Alder (premios Nobel de Química 1950), la ruptura se suele dar a través de un mecanismo tipo Diels-Alder de regreso, lo que le da un carácter reversible (ver Figura 3). Otro posible tipo de ruptura se da en los llamados polímeros supramoleculares, donde los monómeros interactúan formando enlaces no covalentes. Aquí, los monómeros pueden interactuar a través de puentes de hidrógeno, coordinación metálica, o simplemente a través de fuerzas de van der Waals. Todos estos tipos de enlace supramoleculares son reversibles. Los polímeros Diels-Alder son un ejemplo de polímeros covalentemente enlazados que pueden autocurarse mediante un proceso reversible. Así, el estrés o el calor pueden generar rupturas Diels-Alder, y el enlace se puede volver a formar (no necesariamente el mismo, puede y suele ser entre otros monómeros) a bajas temperaturas, en las mismas condiciones en las cuales se forma el polímero original (mediante la generación de enlaces Diels-Alder). La reacción reversible de Diels-Alder también se utiliza para unir cadenas independientes de polímeros a través de enlaces entrecruzantes reversibles. Así, a baja temperatura se obtiene una red polimérica entrecruzada que se rompe a alta temperatura, aunque no se rompan las cadenas individuales. La misma reacción permite la copolimerización de monómeros multifuncionales (esto es que pueden producir la reacción Diels-Alder por varios sitios a

la vez), que dan lugar a materiales que se regeneran a baja temperatura y se rompen a temperaturas elevadas (unos 120 °C). Además de la reacción de Diels-Alder, también es posible sacar provecho de otros tipos de reacciones reversibles como la de oxido-reducción, para generar enlaces covalentes que presenten reversibilidad ante cambios en las condiciones del medio. Por ejemplo, es posible emplear la reacción de oxidación de tioles para entrecruzar a dos cadenas de polímero por sus grupos laterales [Saegusa, 1993]. Este enlace se rompe en un medio reductor y se vuelve a generar bajo condiciones oxidantes. Otra posibilidad es sacar provecho de la reacción de metátesis (transposición) que tiene lugar entre disulfuros aromáticos a temperatura ambiente. Los polímeros suaves compuestos de urea y uretano son capaces de utilizar esta reacción y autorrepararse, incluso luego de haber sido cortados a la mitad [Ying, 2014].

La estrategia extrínseca intenta emular a la naturaleza. Cuando nosotros vamos, ella ha ido y vuelto muchas, muchas veces<sup>7</sup>. Los seres vivos son capaces de curarse de forma muy eficiente (algunos mejor que otros, siendo el ajolote uno de los mejores maestros [Aguilar-López, 2013]). En particular, los humanos, cuanto más jóvenes somos mejor nos autorreparamos. Esta habilidad la vamos perdiendo con el tiempo y hay mucha investigación entorno a qué hacer para que no ocurra, o que ocurra más lentamente (el premio Nobel de Medicina 2012 tiene que ver con esto). Los tejidos se autorreparan, pero no lo hacen sin dejar rastro y quedan cicatrices [Nguyen, 2009]. Las cicatrices difieren del tejido original, tienen otras propiedades. Tanto en plantas como animales, primero

ocurre un proceso rápido de cicatrización, el cual previene la pérdida de fluidos y la exposición a patógenos, y luego le sigue un proceso más lento de cura. El proceso completo restaura parcialmente las propiedades originales del tejido.

En los polímeros autocurables que siguen la estrategia extrínseca [White, 2001], dada la eventualidad de un daño, primero ocurre un proceso de activación donde algunas de las microcápsulas se rompen para verter su contenido. El segundo proceso es justamente la transferencia de moléculas al lugar del daño desde las microcápsulas rotas, y el tercero es la reparación química. Este último proceso involucra la transferencia electrónica de unos orbitales moleculares a otros para el establecimiento de nuevos enlaces. Esto último puede ocurrir mediante la polimerización (el mismo proceso por el cual se genera el polímero original), pero también puede ser a través del entrecruzamiento (esto ocurre entre los lados de dos cadenas y no en sus extremos), o simplemente por estimular el enredo físico (aquí no hay reacción química, no hay formación de enlaces nuevos). Los materiales autocurables extrínsecos pueden lograr eficiencias de curado del 100%, incluso cuando ocurren daños importantes [White, 2001].

Las microcápsulas contienen al monómero y, generalmente, la matriz del polímero al catalizador que hace posible la polimerización a temperatura ambiente. Catalizador y monómero no pueden ir juntos, por obvias razones. El diseño de las cápsulas debe garantizar que se libere el material ante la ruptura, pero no ante el uso convencional del material. Además, una vez liberado el monómero, el catalizador debe solubilizar-

<sup>7</sup> Si la naturaleza no ha inventado el Nylon es, simplemente, porque no le ha parecido una buena idea.

se en él, de modo que se forme una mezcla monómero-catalizador capaz de reparar la matriz polimérica dañada. Por último, el catalizador no debe reaccionar con el aire ni con la humedad para mantenerse activo durante la vida útil del material. Otra estrategia es la de confinar al catalizador en microcápsulas diferentes a las del monómero, lo que permite utilizar una más amplia variedad de catalizadores.

En lugar de microcápsulas también es posible utilizar un sistema de vasos (microcapilares) que pueden o no estar interconectados [Wang, 2006]. Si lo están, pueden formar redes en una, dos, o tres dimensiones. Si no lo están, se conocen como canales discretos. Los canales se suelen crear por separado y luego se embeben en el material. A mayor número de canales mejor se cura el material, pero también disminuyen sus propiedades mecánicas (más material polimérico se reemplaza por canales que contienen monómeros). Una de las estructuras más recurrentes es la del tipo sándwich (emparedado), donde los canales se disponen en medio y el curado se da desde el centro hacia la periferia. Las redes vasculares son más eficientes que los canales discretos, pero son más difíciles de construir y, por ende, más caros. Hay varias estrategias para formar este tipo de redes, como escritura por inyección, la utilización de redes de nanotubos de carbono, superficies porosas resbaladizas impregnadas de líquidos, y costuras de hilo de sacrificio (éstas se quitan calentando y agregando agua, dejando la red de vasos deseada).

## **2.5 Polímeros termo y pH-responsivos (o sensibles)**

Hasta ahora nos hemos concentrado en polímeros en la ausencia de disolventes. Sin embargo, muchos polímeros interaccionan

frecuentemente con ellos. Sin ir más lejos, las proteínas (polímeros cuyos monómeros son los veinte aminoácidos esenciales, de los cuales, diez debemos ingerir), el ADN y el ARN son polímeros que interaccionan con un medio acuoso. Un cambio en las propiedades del solvente puede afectar drásticamente el comportamiento de una de estas moléculas. Por ejemplo, el ADN que se encuentra en todas y cada una de nuestras células mide un par de metros de longitud. No, no nos equivocamos, dos metros que deben, de alguna forma, plegarse y empacarse en el núcleo de cada célula, y éstas son de unos pocos micrómetros de diámetro. Es el equivalente a empaquetar 40 km de una fibra muy delgada en el volumen que ocupa una pelota de tenis [Alberts, 2002]. Esto es posible porque, a pesar de ser una cadena negativamente cargada, tiene un radio del orden de un nanómetro, y la presencia de contraiones divalentes permiten su colapso. De hecho, también es posible empaquetarlas formando estructuras curiosas cuando se mezclan con fosfolípidos [Radler, 1997; Odriozola, 2006]. Pero en ausencia de iones en el medio en el que están inmersas, las cadenas se extienden y rigidizan debido a su carga eléctrica repulsiva [Mills, 2004].

Por otro lado, las proteínas son sensibles a la temperatura. Todo el mundo ha visto alguna vez qué le ocurre a la clara del huevo cuando se cuece. Ésta transita de transparente a blanca; algo pasa allí. Primero ocurre la desnaturalización de las proteínas. Esto es, pierden su funcionalidad dado que la agitación térmica rompe su estructura tridimensional sin afectar a sus enlaces químicos. Sigue siendo el mismo polímero, pero espacialmente arreglado de otra forma. Luego, al incrementar un poco más la temperatura, las proteínas se vuel-

ven poco solubles en el medio dispersante y comienzan a coagular. Este proceso genera tamaños de agregados más y más grandes que dispersan más y más luz visible (lo que se conoce como efecto Tyndall) dando lugar a la aparición del color blanco (dispersión de Mie) y a un cambio en las propiedades físicas del material (la clara deja de ser líquida y pasa a ser un gel, una red tridimensional polimérica). Curiosamente, las proteínas de la clara del huevo producen su cambio de fase (de dispersas a agregadas) a temperaturas más bajas que las de la yema (debido a su contenido lipídico), proceso que además consume energía en forma de calor (es endotérmico) [Benavente, 2014]. Entonces, la temperatura de la yema se mantiene más o menos constante durante el tiempo de cocción de la clara, y por debajo de su temperatura de cambio de fase. Esto explica cómo es posible preparar un huevo estrellado en su punto<sup>8</sup>. Entonces, los polímeros muy bien pueden ser sensibles a la composición del medio y al cambio de la temperatura. Pasemos ahora a ver qué se ha sintetizado, dado este conocimiento.

La poli(N-isopropilacrilamida) (pNIPAM) es uno de los polímeros termosensibles más estudiados [Kolouchova, 2021]. Su monómero, el NIPAM, se compone de dos grupos apolares, el isopropil y otro formado por un par de átomos de carbono que son parte de la cadena principal, y el grupo polar amida. Este grupo amida es idéntico al que se forma mediante el enlace peptídico y que es parte de la cadena principal de las proteínas, por lo que el pNIPAM es considerado un modelo de proteína. El pNIPAM es soluble en agua por debajo de los 32 °C y no lo es por encima de ella [Kolouchova, 2021]. A esta temperatura, 32 °C, se le de-

nomina temperatura crítica inferior de solubilidad, y por debajo de ésta, el polímero no presenta separación de fases. El diagrama de fases de la mezcla de este polímero con agua está invertido [Kolouchova, 2021], con las ramas de baja y alta densidad extendiéndose hacia mayores temperaturas y convergiendo en el punto crítico al bajar la temperatura. Esto ya es raro de por sí. Un diagrama de fases normal es justamente al revés, donde los incrementos de temperatura favorecen el caos molecular y el mezclado de las componentes.

Existe un criterio muy recurrido en termodinámica, basado en la segunda ley, que establece cuándo un cambio de estado es o no espontáneo. Una de sus formas, para sistemas a temperatura y presión constantes, dice: el proceso puede producirse si el cambio de la energía libre de Gibbs entre ambos estados,  $\Delta G$ , es negativo y, en caso contrario, no ocurre nada, el sistema se queda en el estado inicial. A su vez, este cambio de la energía libre de Gibbs del sistema viene dada por [Sigalotti, 2022]

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S,$$

es decir, que es igual al cambio de entalpía,  $\Delta H$ , menos la temperatura por el cambio de entropía,  $T\Delta S$ . Veamos cómo funciona el criterio con un ejemplo concreto. Digamos que estamos estudiando el posible cambio de estado de líquido a vapor del agua, por dar un ejemplo muy familiar. Tomemos al líquido como estado inicial y al vapor como posible estado final. Ambos cambios, el de entalpía y el de entropía son positivos, dado que para el estado de partida (el líquido) se tienen menores valores de estas cantidades. Esto es porque la alta densidad del líquido favorece la interacción molecular, lo que baja su entalpía (y energía interna), mientras reduce el nú-

<sup>8</sup> La clara cocida y la yema cruda, el resto de las formas simplemente están mal.

mero de posibles microestados, disminuyendo su entropía (este número de posibilidades incrementa con el volumen, y esto es lo que ocurre con el gas). Entonces, a baja temperatura, donde  $T\Delta S$  es pequeño, el cambio de energía libre es gobernado por la entalpía, y siendo esta cantidad positiva, produce un  $\Delta G$  positivo. De acuerdo al criterio de espontaneidad no es posible un cambio de estado, y el sistema se queda en su estado inicial. Por el contrario, por encima de cierta temperatura donde  $T\Delta S$  supera a  $\Delta H$ ,  $\Delta G$  se vuelve negativo y se ve favorecida la formación de vapor. Decimos que para el pNIPAM el estado condensado, el líquido, ocurre a temperatura elevada, y el vapor, el estado disperso o disuelto, ocurre a temperaturas bajas (en esta visión tomamos al disolvente como a un continuo y solo nos fijamos en el polímero). Veamos qué dice la misma ecuación termodinámica tomando como punto de partida al estado agregado (líquido). En este caso  $\Delta H < 0$ , dado que el agregado no favorece la formación de puentes de hidrógeno entre el grupo amida del pNIPAM y el agua. Por otro lado,  $\Delta S < 0$  porque el agua (la especie mayoritaria) pierde configuraciones cuando el polímero expone más área al solvente (Pérez-Ramírez, 2020). Entonces, a baja temperatura gobierna la entalpía favoreciendo al estado desagregado, mientras que a alta temperatura gobierna el cambio de entropía (también negativa) favoreciendo al estado agregado. Esto es justamente lo opuesto a la situación del cambio de fase líquido-vapor del agua (o, de hecho, de cualquier sustancia pura para la transición líquido-vapor).

Entonces, la afinidad por el agua del pNIPAM cambia al transitar de una temperatura por debajo de la crítica, donde es hidrofílico (se disuelve), a una por encima de ésta, donde es hidrofóbico (se agrega).

Este cambio de afinidad depende también de otras propiedades del disolvente [Pérez-Ramírez, 2019]. Digamos que ahora sintetizamos pNIPAM de forma tal que se generan cúmulos de estos polímeros entrecruzados. Estos cúmulos van a formar entidades nano o micrométricas de redes poliméricas entrecruzadas conocidas como nano o microgeles [Widmann, 2019]. Por lo tanto, una dispersión de nano o microgeles está formada por partículas bien definidas e independientes de polímero entrecruzado, que no pueden perder su identidad, dado que sus enlaces covalentes las mantienen unidas, pero que van a poder reaccionar a la temperatura y a otras propiedades del medio [Ledesma-Motolinía, 2015] (ver Figura 4).

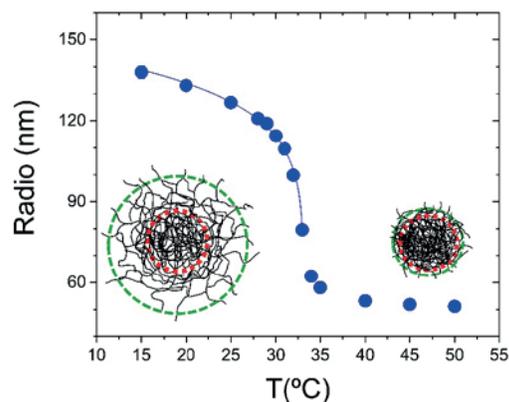


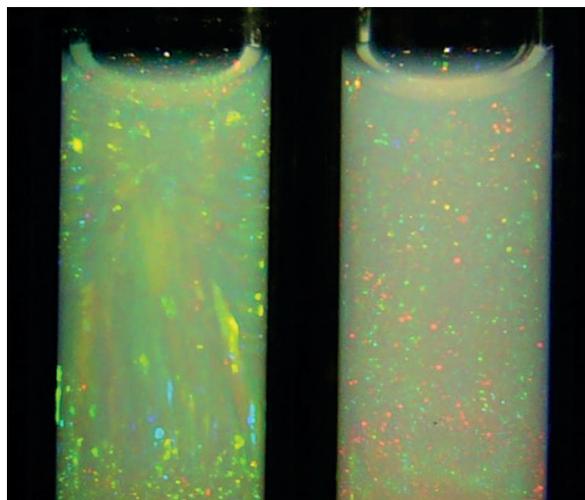
Figura 4. Dependencia del tamaño del microgel de PNIPAM con la temperatura. La línea continua es un ajuste a una función crítica que proporciona una temperatura de transición de 33.7 °C.

A bajas temperaturas, la partícula se expande y se llena de agua, mientras que a temperaturas elevadas se contrae deshidratándose (el cambio del volumen de la partícula puede ser de un factor mayor a diez). Además, a elevadas temperaturas suelen agregar, lo que conlleva a un incremento en la turbidez del medio, pasa de transparente a blanco, igual que la clara

del huevo. Se han desarrollado estrategias de síntesis para lograr que la partícula sea, además, hueca [Nayak, 2005]. Entonces, la partícula es una especie de cápsula que se cierra a temperaturas por encima de la crítica y se relaja por debajo de ésta. Este tipo de partículas se emplean como administradores de fármacos de liberación controlada<sup>9</sup> [Moncho-Jordá, 2020]. Se cargan a bajas temperaturas, cuando la difusión del fármaco a través de la pared es alta, y se sellan a temperaturas por encima de la temperatura crítica.

Otras propiedades del disolvente, como el pH, también pueden producir un cambio dramático en la hidratación del polímero (si el disolvente es agua). Existen polímeros naturales que presentan esta propiedad, como el ácido hialurónico (el que se inyecta en las articulaciones para disminuir la fricción y proteger a los cartílagos y en otras partes del cuerpo para ganar volumen), y polisacáridos como el quitosán y dextran. Estos, además, presentan muy buena (o total) biocompatibilidad, por lo que también son utilizados para la administración controlada de fármacos [Trombino, 2019]. La síntesis de este tipo de polímeros permite combinar sensibilidad al pH con otras propiedades como sensibilidad a la temperatura. Para ello, se suele polimerizar a varios tipos de monómeros diferentes. Se pueden sintetizar copolímeros convencionales (donde los monómeros vienen secuenciados más o menos al azar) o copolímeros de bloques, donde las cadenas presentan unas pocas regiones (generalmente dos o tres) compuestas del mismo monómero, pero diferentes entre sí (diferentes regiones compuestas por diferentes monómeros) [Meléndez-Ortiz,

2016]. También es posible sintetizar polímeros con estructura de estrella (varios brazos parten de un mismo centro), ramificados (cada tanto el polímero se ramifica), tipo cepillo (donde muchas cadenas penden de una cadena principal), y con estructuras híbridas. Estos polímeros, a su vez, se autoensamblan formando micelas de diferente morfología, como esferas, cilindros, o sándwiches. Ahora, controlando el pH y la temperatura, es posible también controlar la superestructura que forman y, entonces, es posible cambiar de cilindros a sándwiches o a esferas de forma controlada y reversible.



*Figura 5. Suspensión de microgeles de PNIPAM en fase cristalina, lo que da origen al fenómeno de iridiscencia cuando las muestras son iluminadas con luz blanca.*

Aparte de ser utilizados para la administración controlada de fármacos, los polímeros sensibles encuentran aplicaciones en la purificación de aguas y en procesos de separación de especies químicas en general, donde se suelen sintetizar membranas. También son utilizados como sensores y biosensores, y se está estudiando la

<sup>9</sup> Muchos fármacos tienen tiempos de vida media relativamente cortos y conviene que se liberen de a poco para mantener una concentración estable en sangre, sin la necesidad de recurrir a varias tomas.

posibilidad de utilizarlos como músculos artificiales. Además, formando arreglos cristalinos de partículas de microgel (ver Figura 5) se han encontrado aplicaciones como filtros ópticos (cristales fotónicos). En estos sistemas, es posible controlar el espaciado de la red y, por lo tanto, su respuesta lumínica. Los polímeros termosensibles podrían, por ejemplo, abrir o cerrar ventanas dependiendo de la temperatura, como lo haría cualquier ser medianamente inteligente que pretenda no pasar frío.

### 3. Conclusiones

Es con los polímeros responsivos que concluimos este viaje. Como el lector podrá apreciar, hay de todo un poco. Ahora se ve con mayor claridad cuál es la dificultad de dar una definición única y amplia que abarque cosas tan dispares como piezoeléctricos y polímeros cromogénicos, pasando por polímeros autorreparables y termoresponsivos. La definición de material inteligente se vuelve vaga justamente por su intento de abarcarlos a todos<sup>10</sup>; es mucho más fácil definir a cada uno por separado. Sin embargo, y aún con limitaciones en su definición, el concepto de material inteligente es cada vez más popular. Hoy, cualquier ingeniero debe tener una idea más o menos clara de a qué se refiere la gente con la adjetivación tan absurda de un material.

### 4. Análisis Prospectivo

Nanorrobots capaces de resolver laberintos y autoensamblarse, sistemas de entrega de fármacos dosificables y a domicilio (donde sean requeridos y no de forma generalizada), pantallas más eficientes, delgadas y flexibles, con menores tiempos de respuesta y negros más negros, paneles solares flexibles, semitransparentes, más

económicos y duraderos, telas emisoras de luz, ropa fotocromática, gomas autorreparables y asesinos de bacterias resistentes [Li, 2022] son algunas de las posibilidades que hoy ya nos ofrecen los polímeros inteligentes. ¿Y mañana?... mañana quién sabe.

### Referencias

Aguilar-López J.L., López-Sánchez J., Villar-Salazar C., Axolotl, letra por letra. *Ciencia* abril-junio, 78-83 (2013)

Alberts B., Johnson A., Lewis J., Raff M., Roberts K., Walt P., *Chromosomal DNA and Its Packaging in the Chromatin Fiber, In Molecular Biology of the Cell*. 4th edition. (New York: Garland Science, 2002).

Ameri T., Dennler G., Lungenschmied C., Brabec C., Organic tandem solar cells: A review. *Energy & Environmental Science*. 2, (2009).

Benavente R.P., *La física de los huevos*, El Confidencial, (2014).

Biard, James R. and Pittman Gary, *Semiconductor Radiant Diode*, US Patent No 3293513, (1962).

Chu P.K., Lu X.P.(Eds.), *Low Temperature Plasma Technology: Methods and Applications*. CRC Press. (2013).

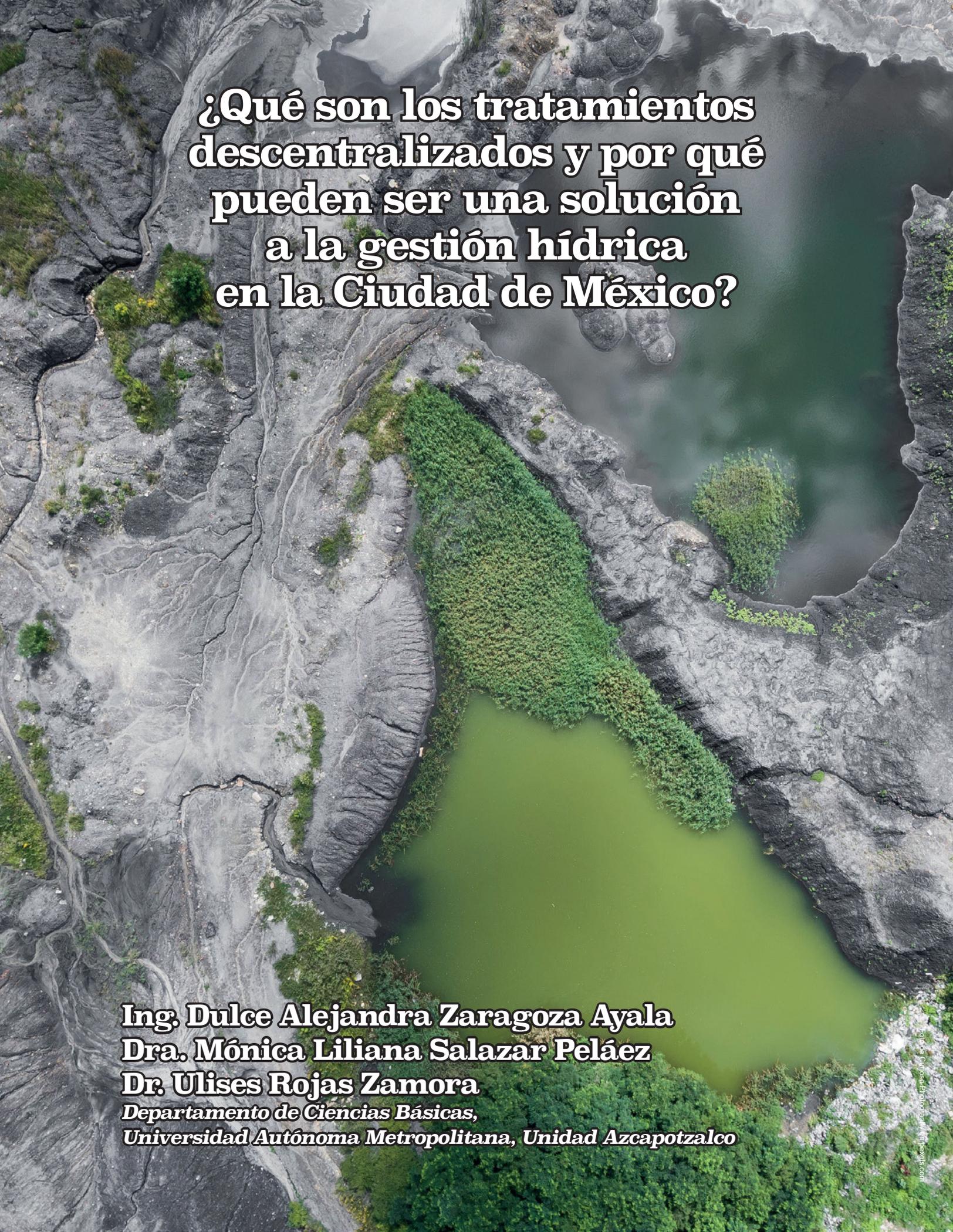
Dutta P.S., Liotta K. M., Full Spectrum White LEDs of Any Color Temperature with Color Rendering Index Higher Than 90 Using a Single Broad-Band Phosphor. *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 7: R3194–R3198 (2018).

Ferrara M., Murat B., *Materials that Change Color: Smart Materials and Intelligent Design*, Springer, (2014).

<sup>10</sup> Bien dice el refrán que quien mucho abarca poco aprieta.

- Ghosh S.K., *Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications*, Weinheim: Wiley-VCH. 145 (2008).
- Gray G.W., *Molecular Structure and the Properties of Liquid Crystals*. Academic Press (New York 1962).
- Gustafsson G., Cao Y., Treacy G. M., Klavetter F., Colaneri N., Heeger A. J., Flexible light-emitting diodes made from soluble conducting polymers. *Nature* 357, 477–479, (1992).
- Kolouchova K., Lobaz V., Beneš H., de la Rosa V.R., Babuka D., Švec P., Černoch P., Hruby M., Hoogenboom R., Štěpanek P., Groborz, O. Thermoresponsive properties of polyacrylamides in physiological solutions. *Polymer Chemistry* 12, 5077–5084 (2021).
- Ledesma-Motolinia M., Braibanti M., Rojas-Ochoa L.F., Haro-Perez C., Interplay between internal structure and optical properties of thermosensitive nanogels. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 482, 724-727, (2015).
- Mahajan M.S., Gite V.V., *Microcapsule-Assisted Smart Coatings In Applications of Encapsulation and Controlled Release*, Taylor and Francis, 249, (2019).
- Meléndez-Ortiz H.I., Varca H.C., State of the art of smart polymers: from fundamentals to final applications. *Polymer Science: research advances, practical applications and educational aspects*, 476-487, (2016).
- Mills J.B., Hagerman P.J., Origin of the intrinsic rigidity of DNA. *Nucleic Acids Res.* 32, 4055-4059 (2004).
- Moncho-Jordá A., Jódar-Reyes A.B., Kan- duč M., Germán-Bellod A., López-Romero J.M., Contreras-Cáceres R., Sarabia F., García-Castro M., Pérez-Ramírez H.A., Odriozola G. Scaling Laws in the Diffusive Release of Neutral Cargo from Hollow Hydrogel Nanoparticles: Paclitaxel-Loaded Poly (4-vinylpyridine), *ACS nano* 14, 15227-15240, (2020).
- Nayak S, Gan D, Serpe MJ, Lyon LA. Hollow thermoresponsive microgels. *Small*. 1, 416-21, (2005).
- Nelson J., Polymer: fullerene bulk heterojunction solar cells. *Materials Today*. 14 (10): 462–470, (2011).
- Nguyen D.T., Orgill D.P., Murphy G.T., *The Pathophysiologic Basis for Wound Healing and Cutaneous Regeneration*. In *Biomaterials for Treating Skin Loss*. Elsevier, 25–57, (2009).
- Odriozola G., Jiménez-Ángeles F., Lozada-Cassou M., Effect of Confinement on the Interaction between Two Like-Charged Rods. *Physical Review Letters* 97, 018102 (2006).
- Pérez-Ramírez H.A., Haro-Pérez C., Odriozola G., Effect of Temperature on the Cononsolvency of Poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAM) in Aqueous 1-Propanol. *ACS Applied Polymer Materials* 1, 2961-2972, (2019).
- Pérez-Ramírez H.A., Odriozola G., A coil-to-globule transition capable coarse-grained model for poly (Nisopropylacrylamide). *Physical Chemistry Chemical Physics* 22, 17913-17921, (2020).
- Radler J.O., Koltover I., Salditt T., Safinya C. R., Structure of DNA-cationic liposome

- complexes: DNA intercalation in multilamellar membranes in distinct interhelical packing regimes. *Science* 275, 810 (1997).
- Saegusa T., Sada K., Naka A., Nomura R., Saegusa T., Synthesis and redox gelation of disulfide-modified polyoxazoline. *Macromolecules* 26 (5): 883–87 (1993).
- Sigalotti L., Cruz F., Odriozola G., *Introducción a la Termodinámica*, Alfaomega, (México, 2022).
- Staudinger H., Über Polymerisation. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft* (A and B Series). 53 (6): 1073–1085, (1920).
- Trombino S., Servidio C., Curcio F., & Cassano R., Strategies for Hyaluronic Acid-Based Hydrogel Design in Drug Delivery. *Pharmaceutics*, 11(8), 407, (2019).
- Wang K.M., Lorente S., Bejan A., Vascularized networks with two optimized channel sizes. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 39 (14): 3086–96, (2006).
- White S.R., Sottos N.R., Geubelle P.H., Moore J.S., Kessler M.R., Sriram S.R., Brown E.N., Viswanathan S., Autonomic healing of polymer composites. *Nature*. 409, 794–97 (2001).
- Widmann T., Kreuzer L.P., Hohn N., Biesmann L., Wang K., Rinner S., Moulin J.F., Schmid A. J., Hannappel Y., Wrede O., Kuhnhammer M., Hydration and Solvent Exchange Induced Swelling and Deswelling of Homogeneous Poly(N-isopropylacrylamide) Microgel Thin Films. *Langmuir*. 35, 16341–16352, (2019).
- Ying H., Zhang Y., Cheng J., Dynamic urea bond for the design of reversible and self-healing polymers. *Nature Communications*, 5, 3218, (2014).
- Zhao Y., Chi Y., Hong Y., Li Y., Yang S., Yin J., Twisting for soft intelligent autonomous robot in unstructured environments. *PNAS*, 119, e2200265119, (2022).

An aerial photograph of a rugged, rocky landscape. A stream flows through the center, surrounded by dark, jagged rock formations. A large, vibrant green pool of water is visible in the lower right quadrant. The overall scene is natural and somewhat desolate.

**¿Qué son los tratamientos descentralizados y por qué pueden ser una solución a la gestión hídrica en la Ciudad de México?**

**Ing. Dulce Alejandra Zaragoza Ayala**  
**Dra. Mónica Liliana Salazar Peláez**  
**Dr. Ulises Rojas Zamora**  
*Departamento de Ciencias Básicas,  
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco*

## Resumen

Las condiciones de sequía se han intensificado en diversos estados del país en los últimos años, causando problemas graves de escasez de agua que derivan en el racionamiento del recurso, generando situaciones que disminuyen el nivel de vida de las comunidades afectadas. La Ciudad de México no está exenta de esta situación, pues su principal fuente de abastecimiento de agua, los acuíferos, están sobreexplotados. ¿Qué podemos hacer para que la situación del agua no se agrave en nuestra ciudad? La respuesta está en la gestión hídrica integral que, además de considerar el manejo racional de las fuentes de abastecimiento, debe incluir el tratamiento de las aguas residuales y el reúso de las aguas tratadas. Es así como en este artículo se analiza el panorama de la gestión de los recursos hídricos en la capital y cómo el tratamiento descentralizado representa una opción sostenible para el manejo y aprovechamiento de las aguas residuales y la reducción del estrés hídrico en la entidad.

## Abstract

Drought conditions have intensified in various states of the country in recent years, causing severe problems of water scarcity that lead to the rationing of the resource, generating situations that lower the standard of living of the affected communities. Mexico City is not exempt from this situation as its primary source of water supply, the aquifers, are overexploited. What can we do so our city's water situation does not worsen? The answer lies in comprehensive water management that, in addition to considering the rational management of supply sources, must include treating wastewater and reusing treated water. Therefore, this article analyzes the panorama of water resources management in the capital and how decentralized treat-

ment represents a sustainable option for managing wastewater and reducing water stress in the entity.

**Palabras claves:** Gestión descentralizada, Recursos hídricos, Saneamiento, Tratamiento de aguas residuales

**Keywords:** Decentralized management, Sanitation, Water resources, Wastewater treatment

## ¿Cuál es el panorama de los recursos hídricos en la Ciudad de México?

Aunque el 90% de los habitantes del país cuentan con acceso a agua potable, cerca del 30% sufren por el suministro del recurso en calidad y cantidad insuficiente. Peor aún, se espera que esta situación se agrave pues, según estimaciones para el 2030, la oferta de agua potable en México será solo de 68,300 MMm<sup>3</sup>; sin embargo, la demanda será de 91,200 MMm<sup>3</sup>, dejando un déficit del 25% (Monroy, 2021).

Al ser más alta la demanda de agua potable con respecto a la oferta, surgen problemas de presión sobre el recurso, causados también por la baja calidad del agua que impide su uso para consumo humano, haciendo que la oferta disminuya aún más. Otro factor que influye es la distribución desigual de los habitantes y de las fuentes de abastecimiento de agua en el país: el centro, norte y noroeste concentran el 77% de la población y cuentan con el 33% de agua disponible, en contraste con el sureste que tiene un porcentaje menor de población (23%) y una mayor porción de agua disponible (67%) (SEMARNAT, 2016).

Esta problemática se ve exacerbada especialmente en ciudades con gran cantidad de habitantes, como la Ciudad de México, la cual es la segunda entidad con más ha-

bitantes y la primera con mayor densidad poblacional en el país. En el último censo realizado por el INEGI, se contabilizaron un total de 9'209,944 de habitantes, con un crecimiento absoluto de 358,864 residentes del año 2010 al 2020 (INEGI, 2020), colocándola como la quinta ciudad más poblada del mundo. El crecimiento poblacional que la CDMX ha experimentado en las últimas décadas contribuye al progresivo agotamiento de sus fuentes de agua potable y al deterioro en su calidad, produciendo problemas de disponibilidad, con modelos de gestión desiguales entre grupos de la población.

Por ejemplo, en la Tabla 1 se puede observar que el porcentaje de viviendas sin abastecimiento de agua entubada dentro de la misma y cuya fuente de obten-

ción es del servicio público va del 0.88% al 49.50%. Resaltadas en color verde, se muestran las alcaldías con mayor déficit del servicio de abastecimiento de agua, las cuales son también las que tienen los índices de desarrollo económico más bajos (INEGI, 2020).

La baja disponibilidad de agua potable en las alcaldías señaladas se debe a diversos factores: uno de ellos es que los sistemas Cutzamala y Lerma, que son una importante fuente de abastecimiento, actualmente operan al 60 y 77% de su capacidad instalada, respectivamente (CONAGUA, 2018). Esto se debe a la variación en la precipitación, las extracciones clandestinas desde las conducciones, los cambios en la demanda, la existencia de pozos suspendidos por mala calidad del agua, agrie-

Demarcación territorial	Viviendas particulares habitadas	Ocupantes	Porcentaje de viviendas sin disponibilidad de agua entubada dentro de la vivienda cuya fuente de obtención es el servicio público	Índice de desarrollo económico
Total	2'756,319	9'159,392	11.14	0.40
Álvaro Obregón	219,354	757,117	5.38	0.49
Azcapotzalco	134,168	431,347	7.01	0.49
Benito Juárez	176,053	432,259	0.88	0.58
Coyoacán	191,517	612,130	4.61	0.49
Cuajimalpa de Morelos	60,436	217,606	13.70	0.45
Cuauhtémoc	196,466	540,976	2.21	0.55
Gustavo A. Madero	340,155	1,162,914	8.08	0.33
Iztacalco	117,720	403,805	6.91	0.42
Iztapalapa	504,365	1,820,809	14.27	0.33
La Magdalena Contreras	68,089	246,785	13.54	0.3
Miguel Hidalgo	146,762	412,529	3.76	0.59
Milpa Alta	39,100	152,682	49.50	0.21
Tláhuac	106,935	391,967	22.07	0.26
Tlalpan	202,318	695,308	25.93	0.26
Venustiano Carranza	135,768	443,120	4.19	0.38
Xochimilco	117,113	438,038	33.67	0.29

Tabla 1. Servicios de abastecimiento de agua potable por número de viviendas particulares habitadas y Demarcación territorial e Índice de desarrollo económico (INEGI, 2020).

tamientos y hundimientos del terreno por extracción intensiva del agua y, sumado a esto, destacan los altos costos de operación y mantenimiento que estos demandan (Escolero et al., 2016).

Además, se estima que aproximadamente un 40% del agua se pierde por fugas en la red de distribución de agua potable (Monroy, 2021). Estos sistemas llevan el recurso inicialmente por la zona poniente, dificultando su disponibilidad en la zona oriente y sur, teniendo como consecuencia que las personas que allí viven reciban una menor cantidad de agua, generando problemas graves de escasez (CONAGUA, 2020).

Otra importante fuente de abastecimiento está constituida por los pozos de agua subterránea, los cuales suministran más de un 60% del agua en la CDMX. Sin embargo, la extracción de agua es el doble de lo que se recarga de manera natural; de esta manera, muchos de estos pozos no se encuentran en buenas condiciones. Usualmente, el agua extraída de dichos pozos es potabilizada y repartida entre las distintas alcaldías, pero frecuentemente la presión es insuficiente y se suspende el servicio, tratando de solucionar el desabasto por medio de pipas (Montero, 2020).

Datos del censo de población publicados por el INEGI (2020) muestran que, del total de viviendas particulares habitadas en la CDMX, en 40,685 la única fuente de abastecimiento provenía de pipas. Además, están las viviendas que reciben agua por tandeo, método por el cual se suministra el recurso a tasas muy bajas y no de forma continua, de manera que no se satisfacen adecuadamente las demandas particulares de los hogares, los cuales se ven forzados a implementar agua de pipas como fuente alternativa.

El abastecimiento de agua por medio de pipas trae muchos problemas de diversa índole que impactan negativamente la calidad de vida de la población. Por un lado, no se tienen horarios definidos de abastecimiento, afectando a los habitantes que necesitan este servicio, especialmente a las mujeres, las cuales son el grupo principal que se encarga del suministro de agua (Montero, 2020) y por otro, los altos precios ocasionados por situaciones de corrupción, caracterizadas por la imposición de una cuota para recibir el recurso. Para empeorar las cosas, la calidad de agua se puede ver afectada adversamente cuando los habitantes no cuentan con una cisterna o tinaco adecuados para almacenar el agua y deben usar tambos y cubetas que no son herméticos (Gómez y Palerm, 2015).

Otro factor que afecta negativamente la calidad y cantidad de agua potable disponible es el bajo nivel de tratamiento que reciben las aguas residuales, las cuales muchas veces son vertidas sin tratamiento en cuerpos de aguas naturales, muchos de los cuales constituyen fuentes de abastecimiento para la población. De este tema hablaremos a continuación.

### **¿Cómo se manejan las aguas residuales en la Ciudad de México?**

En México se han implementado sistemas de tratamiento de aguas residuales con enfoque centralizado, caracterizados por el manejo de grandes volúmenes de agua en instalaciones de gran tamaño y complejidad. El mejor ejemplo de este tipo de sistemas es la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Atotonilco, la cual está ubicada en el Valle de Mezquital, Hidalgo y es una de las más grandes del mundo.

Según datos del Banco Mundial, la PTAR de Atotonilco atiende a 10.5 millones de

personas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMVM) y 700,000 habitantes del Valle del Mezquital en Hidalgo. Ocupa un área de 160 hectáreas, con una capacidad promedio de 35,000 L/s y una capacidad máxima de 50,000 L/s. El agua tratada obtenida se usa para irrigar alrededor de 90,000 hectáreas en el Valle del Mezquital, el mayor distrito de riego en México y uno de los más grandes de América Latina.

Las PTAR centralizadas involucran diversos procesos y operaciones unitarias para realizar el tratamiento de las aguas residuales. En términos generales, los procesos empleados son de tipo físico, químico y biológico que, a su vez, pueden combinarse entre sí; como ejemplo, un esquema de tratamiento puede incluir unidades de sedimentación primaria, reactores biológicos, sedimentación secundaria y desinfección (CONAGUA, 2015). La PTAR de Atotonilco está diseñada para operar con dos tipos diferentes de tratamiento: por un lado, un tren de procesos fisicoquímicos basados en un tratamiento químico con coagulantes para depurar las aguas de lluvia y, por el otro, un tratamiento biológico con lodos activados de alta tasa para tratar las aguas residuales municipales que llegan de la ZMVM.

Aunque bajo este enfoque centralizado el país ha aumentado su capacidad de tratamiento de aguas residuales, lo cierto es que, durante 2021, las 2,872 PTAR instaladas en el país trataron sólo el 67% de las aguas residuales recolectadas a través de los sistemas de alcantarillado (CONAGUA, 2021). Este valor es más bajo que la media nacional en saneamiento básico alcanzada en países como Argentina y Chile, los cuales tienen coberturas mayores al 80% (Noyola et al., 2013).

En la CDMX la situación es peor que el promedio nacional, pues en 2020 las PTAR

instaladas tenían una capacidad de tratamiento de 5.6 m<sup>3</sup>/s, pero únicamente trataron 2.4 m<sup>3</sup>/s, es decir, operaban al 43% de su capacidad (CONAGUA, 2020). Según la SEDEMA, para 2016 existían 271 PTAR, siendo la alcaldía Azcapotzalco la que tiene el mayor número (39). Las PTAR de la CDMX se encuentran, en su mayoría, en el norte, poniente y centro de la ciudad, donde se concentra la mayor actividad económica. Por el contrario, la alcaldía Milpa Alta, que se ubica al suroeste, solo cuenta con una.

La gestión adecuada de las aguas residuales se dificulta en la CDMX debido a que las alcaldías con menor disponibilidad de agua entubada y con menores índices de desarrollo económico son las mismas que tienen menor cobertura de PTAR, o aquellas en las que no existe reporte de la operación de estas o bien, cuentan con una infraestructura obsoleta debido al deficiente mantenimiento y falta de inversión (SEDEMA, 2015).

### **¿Qué son los tratamientos descentralizados?**

Para aumentar el porcentaje de aguas residuales tratadas y, consecuentemente, su reúso en la CDMX, es necesario adoptar un nuevo enfoque, con soluciones que, además de abordar aspectos técnicos y económicos, cuiden la aceptación social, reduzcan el impacto al ambiente y adopten estrategias innovadoras que fomenten e incluyan el reúso de las aguas tratadas, ya que estas pueden servir como fuente alternativa de abastecimiento en usos que no requieren agua potable como, por ejemplo, el riego de parques y jardines o el combate a incendios, constituyendo así una opción para disminuir la brecha entre la disponibilidad del recurso y su demanda.

Así, la idea de implementar sistemas descentralizados de tratamiento de aguas

residuales (DEWATS, por sus siglas en inglés), resulta ser una alternativa de solución sustentable para la CDMX pues, además de reducir el impacto negativo al medio ambiente y la salud, mejora la gestión de los recursos hídricos (De Anda, 2017).

El concepto de sistemas descentralizados no es nuevo; sin embargo, en la última década ha ganado importancia (Noyola, 2013). Como ejemplo, en Australia alrededor del 12% de la población usa el enfoque descentralizado para la gestión de sus AR, mientras que en Estados Unidos ese porcentaje asciende al 18% (Nasr y Mikhaeil, 2015). Aunque en México no existen estadísticas concretas sobre el uso de sistemas descentralizados, el porcentaje de PTAR que poseen tecnologías de tratamiento empleadas comúnmente en el enfoque descentralizado es menor al 30%, por lo que hay un gran campo de oportunidad para su implementación.

Los sistemas descentralizados se diseñan para operar a pequeña escala y se basan en un conjunto de principios: son tecnologías sencillas y robustas que prescinden de operaciones y mantenimiento costosos y sofisticados, toleran fluctuaciones en el caudal y el tratamiento y reutilización se realizan en el mismo lugar donde se producen las aguas residuales, adaptándose al sitio de implementación.

De acuerdo con De Anda, (2017) el enfoque descentralizado genera múltiples beneficios, tanto técnicos, sociales, económicos y ambientales, algunos de estos se enlistan a continuación:

Al ser sistemas simples, la mayoría de sus partes funcionan sin una fuente de energía externa, y tienen la ventaja que pueden conectarse a las redes de alcanta-

rillado, o ser fácilmente desactivados, además de que comúnmente son operados por mano de obra poco calificada, incluso por las mismas comunidades o usuarios.

El enfoque descentralizado, al tener como premisa ubicar las tecnologías cerca del punto de generación, supera problemas asociados con las condiciones topográficas. Además, la recolección y transporte se simplifican disminuyendo o evitando el bombeo, ya que se utilizan redes de alcantarillado de longitudes cortas, sencillas y adaptadas al sitio, que conllevan una disminución de costos.

Con una adecuada selección y operación de las unidades de tratamiento se pueden alcanzar los objetivos de calidad del agua tratada y obtener valiosos recursos tales como biogás y nutrientes, que contribuyen a generar ingresos. De esta manera, es posible insertar a los sistemas descentralizados en un modelo de Economía Circular, mediante el cual el agua residual es aprovechada, convirtiéndola en productos renovables con valor añadido como agua reutilizable, energía y fertilizantes. Esto es especialmente importante en la actualidad, cuando constantemente crecen la demanda de materias primas y energía a la par de la escasez de recursos.

Ambientalmente, las aguas tratadas en sistemas descentralizados benefician a los ecosistemas pues es posible cumplir con la calidad requerida por las normatividades vigentes, disminuyendo la presión sobre las fuentes de abastecimiento, fomentando el reciclaje de agua y la reutilización de nutrientes.

Socialmente, al tener como punto focal el sitio de generación, se invierte el esquema convencional donde la planificación va desde los

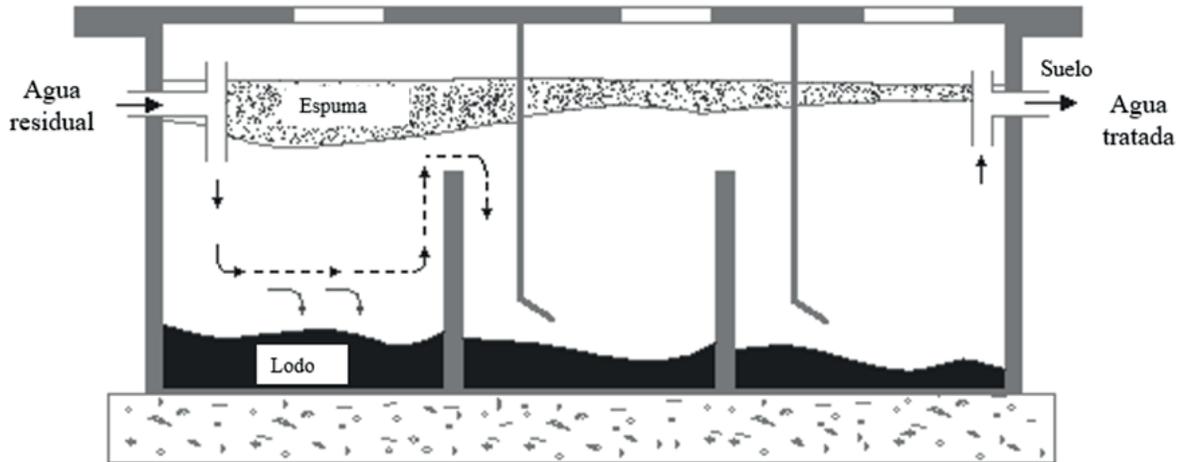


Figura 1. Esquema de un tanque séptico de tres cámaras

gobiernos hacia los usuarios y se promueve que cada comunidad tenga voz en el diseño, operación y mantenimiento de los sistemas (Caicedo, 2014). Y cuando las personas conocen y ejercen sus derechos al participar en las decisiones que les afectan, pueden ayudar a asegurar que esas decisiones se respeten y se adapten a su necesidad de seguridad hídrica.

Entre las tecnologías más populares en el enfoque descentralizado se encuentran los humedales artificiales, los tanques sépticos y el reactor UASB. Estos sistemas de tratamiento descentralizado recientemente han ganado notoriedad debido a sus múltiples ventajas tales como la posibilidad de recuperación de recursos, su simplicidad de construcción y sus bajos costos de inversión y mantenimiento.

**Las fosas o tanques sépticos** (Figura 1) tienen una larga historia en el tratamiento descentralizado por su estructura simple, compacta, robusta y su facilidad de operación y mantenimiento (Fan et al., 2017), así como sus bajos costos debido a una nula demanda de energía eléctrica en su funcionamiento. Son cámaras impermeables donde se desarrollan procesos de sedimentación, almacenamiento y digestión de sólidos. En

principio, el influente fluye por gravedad desde la fuente hasta el sistema. Una vez en el interior, el agua circula lentamente para permitir que los contaminantes se sedimenten y acumulen en el fondo, siendo estabilizados mediante digestión anaerobia y convirtiéndolos en productos más simples como el metano, el cual puede ser aprovechado como fuente de energía (CONAGUA, 2015). De acuerdo con la CONAGUA, en 2020 existían en México 144 tanques sépticos y 62 tanques Imhoff, constituyendo alrededor de un 7% de las PTAR instaladas en el país.

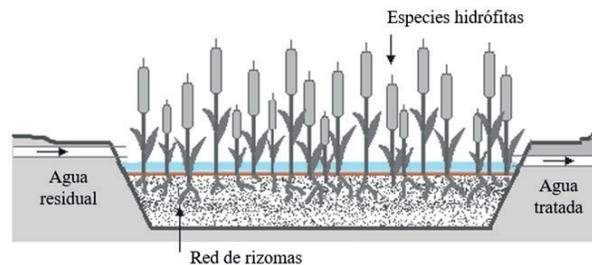


Figura 2. Esquema de un humedal artificial

**Los humedales artificiales** (Figura 2) son sistemas de tratamiento que imitan procesos de purificación naturales. Constán de un estanque o canal poco profundo, en el cual se siembran plantas acuáticas, como por ejemplo la especie *Phragmites australis* (comúnmente llamada carrizo).

Normalmente son instalados en zonas rurales y periurbanas a causa de la extensión de terreno que requieren (De Anda, 2017).

El tratamiento en los humedales ocurre cuando estas plantas almacenan y liberan agua en sus tejidos, realizando un proceso de filtración, absorbiendo nutrientes, permitiendo la degradación biológica de contaminantes y materia orgánica por microorganismos. A su vez, las raíces de estas plantas también funcionan como hábitat para los microorganismos, permitiendo la formación de una biopelícula que contribuye de forma significativa a la remoción de contaminantes (Valencia et al., 2010). En el país hay instalados 230 humedales, que equivalen al 8% de las PTAR a nivel nacional.

Finalmente, **los reactores de lecho anaerobio de flujo ascendente** -UASB, por sus siglas en inglés- (Figura 3) han ganado popularidad, especialmente en América Latina, debido a la necesidad de resolver su problemática sanitaria con tecnologías eficientes, de costos accesibles y viables para la protección del ambiente. En México existen 364 reactores de este tipo, conformando el 13% de las PTAR instaladas. Por ser un proceso anaerobio, es decir, que ocurre en ausencia de oxígeno, el reactor UASB produce biogás (metano), aprovechable como energía.

En el reactor UASB el influente es alimentado por el fondo del mismo, desde donde fluye a través de un denso lecho de lodos anaerobios con buenas características de sedimentación. Aquí es donde se llevan a cabo los procesos de transformación de la materia orgánica a biogás. En su parte superior se ubica un separador trifásico, donde el biogás producido por los microorganismos anaerobios y el lodo flotante son separados del efluente.

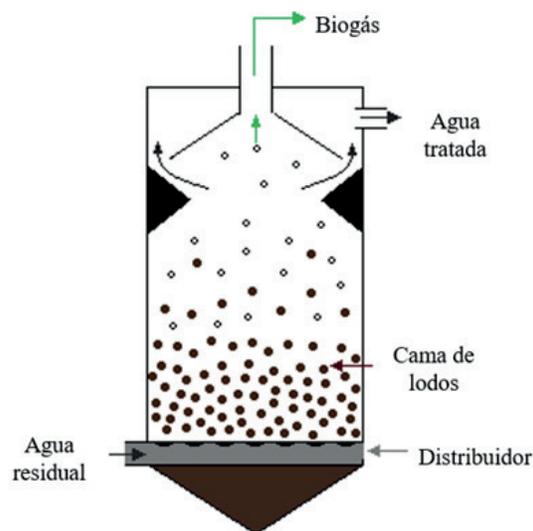


Figura 3. Esquema de un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)

La Tabla 2 presenta de manera sintetizada las ventajas y desventajas técnicas de los sistemas anteriormente mencionados, mostrando que la implementación exitosa de cualquiera de estas tecnologías depende del análisis cuidadoso de las condiciones particulares del lugar donde se desea instalar.

No obstante, existen varios obstáculos de orden gubernamental que deben ser superados para que este enfoque pueda ser exitoso. Uno de los más importantes es la falta de incentivos económicos y programas gubernamentales para los proyectos de saneamiento descentralizado en las comunidades, así como para el reúso de las aguas tratadas (de Anda, 2017).

Es importante recalcar que el reúso de las aguas tratadas puede aumentar la sustentabilidad de las comunidades al disminuir las extracciones de agua de fuentes de abastecimiento superficiales y subterráneas. Además, la creciente escasez de agua puede, en sí misma, ser un incentivo para reutilizar las aguas tratadas.

Sistema	Ventajas	Desventajas
Tanque séptico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presentan bajos costos de construcción</li> <li>• Prescinden de sofisticada mano de obra y mantenimiento</li> <li>• No requieren de mantenimiento frecuente ni de energía para operar</li> <li>• La cantidad de lodo producido durante su operación es mínima</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No son sistemas apropiados cuando el suelo no es permeable y se encuentra en zonas propensas a inundaciones</li> <li>• Los porcentajes de remoción de DQO y nutrientes son bajos, se encuentran el rango de 30-60%</li> </ul>
Humedales artificiales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajos costos de instalación, operación y mantenimiento</li> <li>• No requieren energía externa para su operación ni desprenden olores desagradables</li> <li>• Sobresalen por la generación de paisajes agradables</li> <li>• Eficiencias de remoción de DQO de entre 20-93%, con un promedio de 70%</li> <li>• Además de remover DQO y DBO, eliminan nitrógeno, fósforo y metales pesados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requieren de procesos adicionales de desinfección para eliminar en su totalidad organismos patógenos</li> <li>• En zonas de altitud elevada puede ocurrir que las plantas empleadas no se adapten</li> <li>• Con altas concentraciones de materia orgánica y sólidos son necesarios tratamientos previos</li> </ul>
Reactor UASB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El biogás producido por el sistema es un subproducto valioso</li> <li>• El requerimiento de energía eléctrica es bajo ya que no se requiere de una aireación</li> <li>• Soportan periodos sin alimentación (semanas e inclusive meses)</li> <li>• Bajos requerimientos de espacio para su instalación debido a que operan a altas cargas volumétricas</li> <li>• Construcción simple y económica, al no requerir equipos sofisticados</li> <li>• Las eficiencias de remoción de DQO en los reactores UASB van del 60-80%</li> <li>• Producción de biomasa baja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminación incompleta de patógenos</li> <li>• La calidad del efluente es menor con respecto a los sistemas con proceso aerobio</li> <li>• Suelen presentar olores desagradables debido al escape de gases y fallos en la ventilación o sobrecarga</li> <li>• Requieren de periodos prolongados de arranque derivados de la poca producción de biomasa</li> <li>• Son más sensibles a condiciones ambientales y presencia de sustancias tóxicas y</li> <li>• Pueden producir gases corrosivos</li> </ul>

*Tabla 2. Comparación de las ventajas y desventajas del tanque séptico, los humedales artificiales y el reactor UASB.*

Otro obstáculo que debe ser vencido es la baja cobertura de tratamiento de aguas residuales a partir de sistemas descentralizados, pues las tecnologías convencionales dominan en el mercado lo que, junto con la falta de conocimiento en alternativas

de saneamiento descentralizado, deriva en una selección inadecuada y, por consiguiente, en el fracaso de los proyectos. Por eso es muy importante dar difusión a este tipo de tecnologías a través de artículos de divulgación como este.

## Conclusiones

El panorama de los recursos hídricos en la Ciudad de México es complejo debido a que la principal fuente de abastecimiento, los acuíferos, están sobreexplotados. Esta situación es agravada por el crecimiento poblacional que, con el consecuente aumento de la carpeta asfáltica, impide la recarga natural de los pozos. A estos se suma que la cobertura de saneamiento es baja con respecto al promedio nacional, inclusive con la instalación de grandes PTAR con enfoque centralizado como la de Atotonilco. Por tanto, son necesarias soluciones innovadoras para gestionar de manera integral los recursos hídricos en la ciudad.

Es así como el uso de sistemas de tratamiento de aguas residuales bajo el enfoque descentralizado puede ser una alternativa. Estos sistemas se caracterizan por ser tecnologías sencillas y robustas, de bajo costo que ofrecen la posibilidad de reúso del agua tratada en el mismo lugar donde se producen las aguas residuales, adaptándose al sitio de implementación y mitigando la escasez del agua, sobre todo en usos que no requieren agua potable. Algunos sistemas de tratamiento comúnmente utilizados en el enfoque descentralizado, como los tanques sépticos, los humedales y los reactores UASB, ya son aplicados en otras partes del país con resultados promisorios, por lo que la implementación de estas tecnologías en la ciudad podría resultar muy positiva.

Sin embargo, para que dicha implementación sea exitosa se requiere de la participación de los diferentes niveles de gobierno junto con las comunidades para crear programas que impulsen su instalación y el reúso de las aguas tratadas.

## Referencias

1. Caicedo, J. (2014). *Aspectos claves para*

*la selección de esquemas descentralizados en el manejo de aguas residuales municipales en Colombia*. [Tesis de licenciatura en ingeniería sanitaria: Universidad del Valle]. Biblioteca digital de la Universidad del Valle. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co>.

2. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. CONAGUA. México.

3. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). *Estadísticas del agua en México 2018*. CONAGUA. México.

4. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. SEMARNAT/CONAGUA. México.

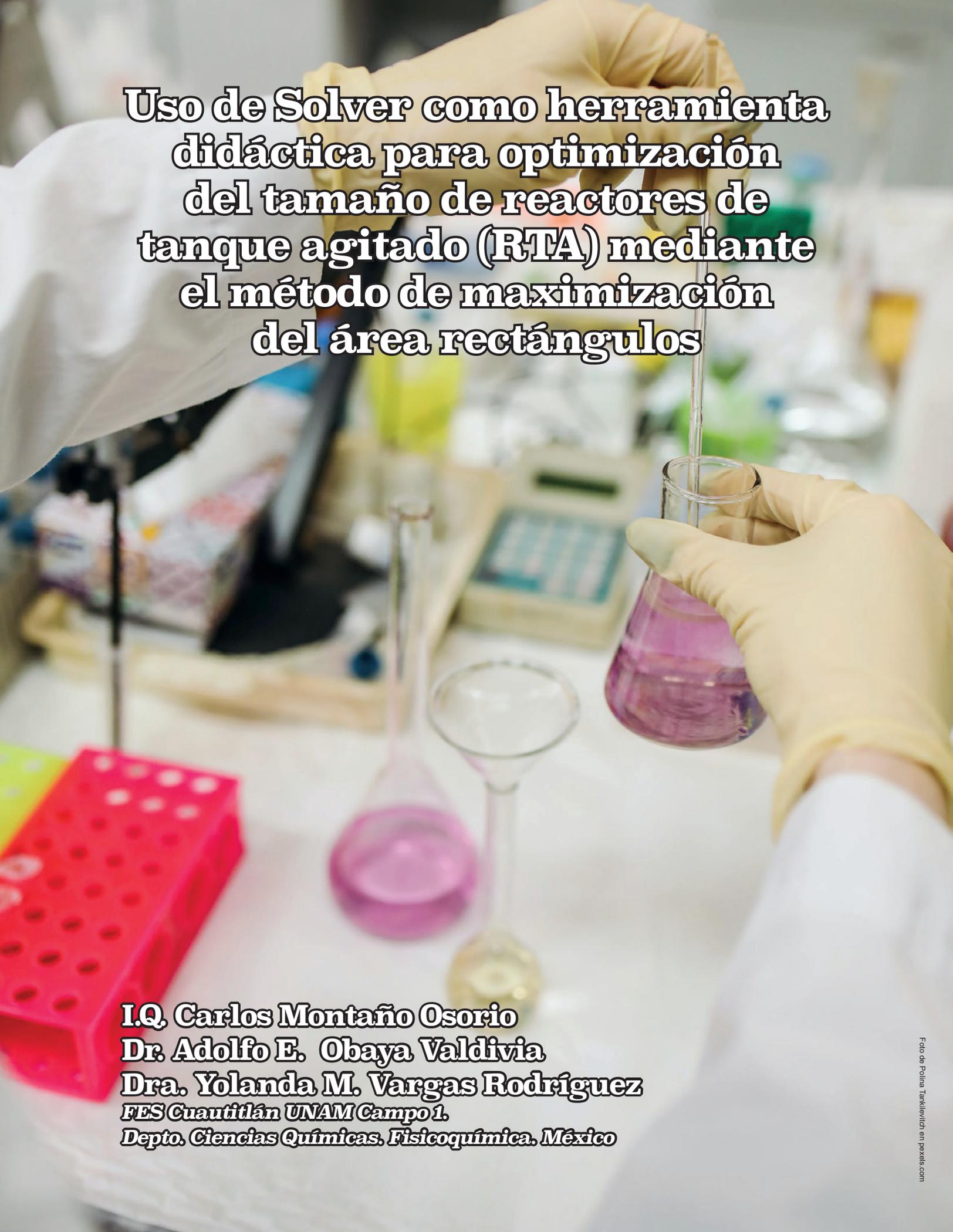
5. de Anda, J. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*, 14, 119–143.

6. Escolero, O., Kralisch, S., Martínez, S. E., & Perevochtchikova, M. (2016). Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 409–427. DOI: 10.18268/BSGM2016v68n3a3.

7. Fan, B., Hongliang, W., Zhang, Y., & Hu, M. (2017). Application and development of septic tank technology in decentralized wastewater treatment. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 11(3), 1314–1321. DOI: 10.12030/j.cjee.201511112.

8. Gómez, M., & Palerm, J. (2015). Abastecimiento de agua potable por pipas en

- el Valle de Texcoco, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 12(4), 567–586.
9. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de Población en México 2020*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
10. Monroy, O. (2021). *Acciones metropolitanas para la gestión sustentable del agua*. ANUIES. México.
11. Montero, D. (2020). El abastecimiento de agua en Iztapalapa: Un análisis institucional. *Revista de Economía Institucional*, 22(43), 301–321. DOI: 10.18601/01245996.v22n43.
12. Nasr, F., & Mikhaeil, B. (2015). Treatment of domestic wastewater using modified septic tank. *Desalination and Water Treatment*, 56, 2073–2081.
13. Noyola, A., Morgan, J., & Güereca, L. (2013). *Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Guía de Apoyo para Ciudades Pequeñas y Medianas*. Instituto de Ingeniería UNAM. México.
14. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. SEMARNAT. México.
15. Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA). (2016). *Reporte de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. SEDEMA. México.
16. Valencia, E., Silva, I., & Narváez, C. (2010). Sistemas Descentralizados Integrados y Sostenibles para el Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas. *Revista Ingeniería y Región*, 7, 66–72



**Uso de Solver como herramienta didáctica para optimización del tamaño de reactores de tanque agitado (RTA) mediante el método de maximización del área rectángulos**

**I.Q. Carlos Montaña Osorio**  
**Dr. Adolfo E. Obaya Valdivia**  
**Dra. Yolanda M. Vargas Rodríguez**  
**FES Cuautitlán UNAM Campo 1.**  
**Depto. Ciencias Químicas. Físicoquímica. México**

## Abstract

The objective of this work is to achieve significant learning and its better understanding by students who are studying Chemical Kinetics and Reactor Design Principles. Using the Excel solver as a didactic tool, it presents the analytical solution to the system of equations generated to determine the optimal size of CSTR reactors that operate in series in an isothermal and isobaric way. The procedure involves knowing the intermediate conversion achieved by each reactor to determine the optimal volume of each unit, which is described by the method of maximizing the area of rectangles on the Levenspiel curve, which is extrapolated “n” reactor units, unlike the graphical method that is iterative and only practical up to three units.

**Keywords:** Chemical Kinetics, Serial CSTR Reactors, Rectangle Method

## Resumen

El objetivo del presente trabajo es ayudar en la obtención de aprendizajes significativos y mejor comprensión por parte de los estudiantes que cursan Cinética Química y Principios de Diseño de Reactores. Utilizando el solver de Excel como herramienta didáctica, se presenta la solución analítica al sistema de ecuaciones generadas para la determinar el tamaño óptimo de Reactores de Tanque Agitado (RTA) que operan en serie de manera isotérmica e isobárica. El procedimiento involucra conocer la conversión intermedia lograda por cada reactor para determinar del volumen óptimo de cada unidad, el cual es descrito por el método de la maximización del área de rectángulos sobre la curva de Levenspiel la cual es extrapolable “n” unidades de reactores, a diferencia del método gráfico que es iterativo y solamente práctico hasta tres unidades.

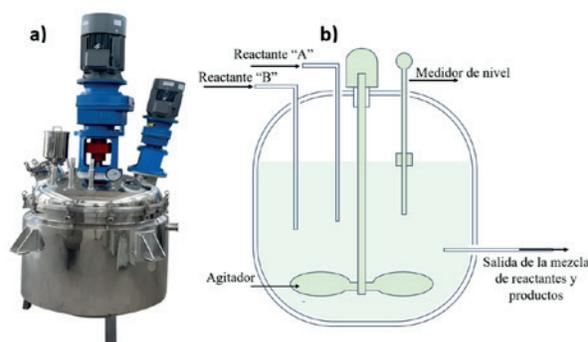
**Palabras clave:** Cinética química, Reactores RTA en serie, Método de los Rectángulos

## Introducción

Se define “reactor químico” como cualquier recipiente en donde se lleva a cabo una reacción química, existen dos tipos de reactores de flujo continuo ideales, el reactor de Tanque Agitado (RTA) también conocidos como CSTR, y el reactor de flujo pistón (PFR). En los reactores de flujo continuo, existen caudales de entrada y de salida, es decir se suministran continuamente los reactivos y salen los productos también de manera continua.

## Reactor de Tanque Agitado (RTA)

Consta de un tanque en el cual se ingresan los reactivos de manera continua e igualmente sale un caudal con los productos, posee una propela que agita completamente la mezcla reactiva, por lo tanto, de asume que la composición de la mezcla reactiva es la misma en cada punto del reactor, así como en la corriente de salida.



*Figura 1 a) Reactor de Tanque Agitado comercial, b) representación esquemática de los componentes del reactor*

La descripción detallada de los reactores químicos reales consiste en la selección apropiada de un modelo matemático que

represente el fenómeno químico que ocurre en el reactor, así como los procesos de transporte involucrados. Algunas reacciones comerciales muy estudiadas son la oxidación de  $\text{SO}_2$  y la producción de amoníaco  $\text{NH}_3$  (Hong et al., 1997; Dashi et al., 2006)

Es común encontrar en la literatura el uso de modelo de reactores ya empleados para reacciones particulares únicamente cambiando las condiciones de operación y en pocas ocasiones de lleva a cabo un estudio fundamental de modelos o arreglos de reactores (Maderos et al., 2009).

Dentro del interés en el modelado de reactores es la minimización del volumen total de un sistema de reactores en serie. Levenspiel (1999), ha desarrollado la minimización del volumen total de una serie de reactores de flujo continuo conectados en serie, en donde ha sugerido una solución gráfica e iterativa, esto presenta algunas inconvenientes ya que al ser un método gráfico conlleva a errores debido a la inexactitud de la iteración. Por otro lado, el estudio de la solución analítica de la minimización del volumen se encuentran métodos matemáticos complejos los cuales utilizan matrices vectoriales (matriz Hessiana) para encontrar el arreglo óptimo (Elizalde et al., 2013), el cual siempre es del menor volumen.

La contribución del presente escrito es presentar el método propuesto por Levenspiel describiendo el método analítico de solución, asimismo se utiliza el Solver de Excel para conocer las conversiones intermedias que logran minimizar el volumen de los reactores, por otro lado, la ventaja del método presentado es que se puede generalizar a “n” unidades de reactores RTA que operan en serie, a diferencia de la

metodología gráfica propuesta por Levenspiel que al ser un método iterativo pierde utilidad cuando hay mas de tres unidades operando.

### **Punto de operación de un reactor RTA (Gráfica de Levenspiel)**

Considerando el reactor de la figura 1, en donde se lleva a cabo la reacción esquemática:



es posible realizar un balance general de materia para uno de los reactivos (generalmente el limitante) el cual está dado por la ecuación 1:

$$\text{Entradas - Salidas + Generación} \\ - \text{Consumo} = \text{Acumulación (1)}$$

Considerando que en todo el volumen del reactor la composición y densidad son constantes se llega a la ecuación general de diseño (ecuación 2).

$$\frac{\tau}{C_{A_0}} = \frac{X_{A_1}}{R_{A_1}} \text{ (2)}$$

Donde  $\tau$  es el tiempo de residencia el cual se relaciona con el volumen del reactor:

$$\tau = \frac{V}{Q_0} \text{ (3)}$$

Siendo  $V$  el volumen del reactor y  $Q_0$  es el flujo volumétrico o caudal alimentado al reactor.

La gráfica de la rapidez de reacción como función de la conversión es conocida como gráfica de Levenspiel (Figura 2a) en la cual se puede observar que el rectángulo formado por las coordenadas de la conversión de salida (eje x) con su respectivo

valor de inverso de rapidez (eje y) forman un rectángulo y el área de dicho rectángulo corresponde al miembro izquierdo de la ecuación 2, por lo tanto esta área es directamente proporcional al volumen del reactor para lograr una conversión determinada (figura 2b).

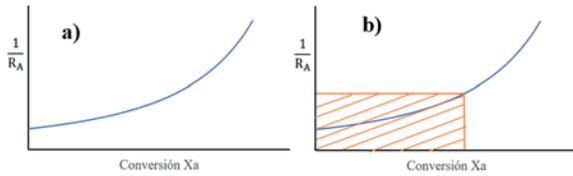


Figura 2 Gráfico de Levenspiel (a) y representación del punto de operación de un solo reactor RTA, el área del rectángulo es directamente proporcional al volumen del reactor (b).

Es factible representar sobre la gráfica de Levenspiel más de un solo reactor CSRT si estos se encuentran formando un arreglo en serie (también llamado batería de reactores), considerando dos reactores en serie como se muestra en la figura 3:

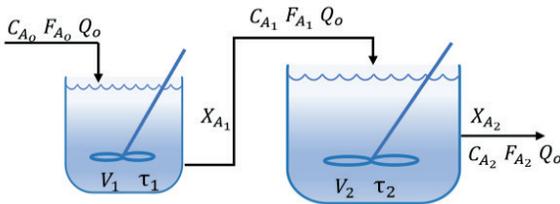


Figura 3 Sistema de dos reactores RTA conectados en serie.

Aplicando el balance general de materia se pueden obtener las ecuaciones de diseño para cada uno de ellos, a saber:

El primer reactor sigue siendo descrito por la ecuación 1, sin en cambio para el segundo reactor la ecuación de diseño es;

$$\frac{\tau_2}{C_{A_0}} = \frac{X_{A_2} - X_{A_1}}{R_{A_2}} \quad (4)$$

La representación de los reactores sobre el gráfico de Levenspiel se ilustra mediante la figura 4.

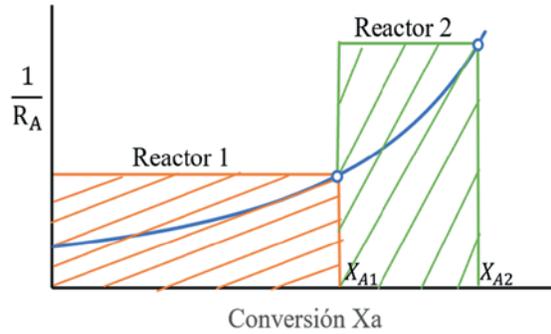


Figura 4 Puntos de operación sobre la gráfica de Levenspiel de dos RTA en serie.

Para una serie de N reactores en serie el reactor i-ésimo es:

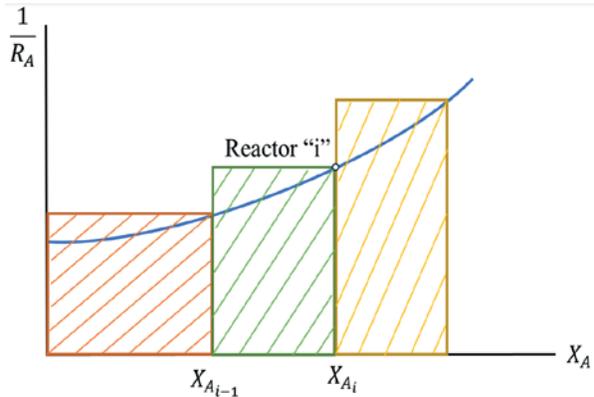


Figura 5 Punto de operación del reactor i-ésimo en una serie de reactores de tanque agitado en serie.

Por lo tanto, generalizando la ecuación de diseño para el reactor i-ésimo:

$$\frac{\tau_i}{C_{A_0}} = \frac{X_{A_i} - X_{A_{i-1}}}{R_{A_i}} \quad (5)$$

**Determinación del sistema adecuado para una conversión dada**  
Si se desea determinar el tamaño mínimo

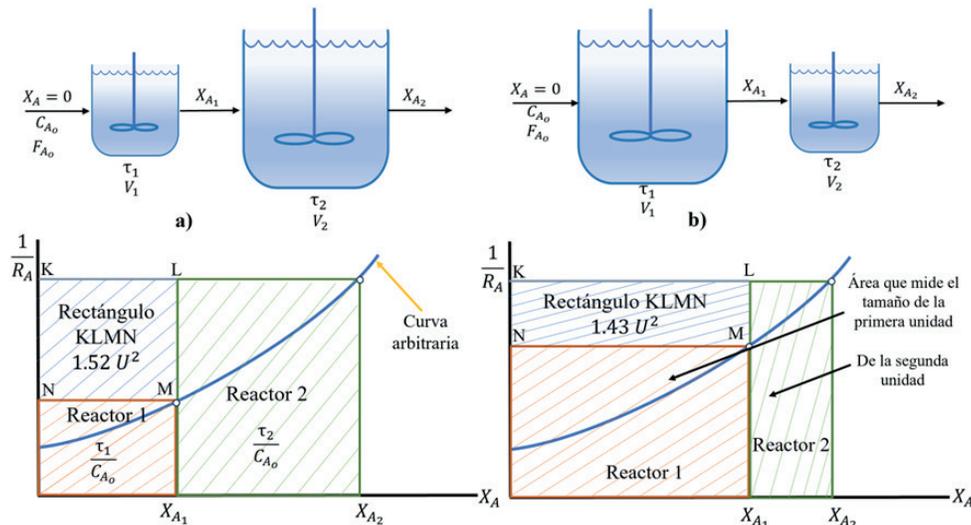


Figura 6 Disposición de dos reactores RTA conectados en serie, en el arreglo a) un reactor pequeño va primero y en b) un reactor grande va al principio. El área del rectángulo KLMN formada es función del orden de conexión

de dos reactores de tanque agitado en serie para alcanzar una determinada conversión de la alimentación que reacciona con una cinética arbitraria pero conocida. Las ecuaciones de diseño (2) y (3) para el primer reactor y el segundo reactor respectivamente se representan en la figura 6 por dos arreglos alternativos de reactores, en los que ambos dan la misma conversión final  $X_{A2}$ .

Como se observa en la figura 6 cuando la conversión intermedia  $X_{A1}$  cambia, también cambia la relación de volúmenes de las unidades (representadas por las dos áreas sombreadas), al igual que el volumen total de los dos recipientes requeridos (área total).

En la figura 6a y 6b se observa que el volumen total del sistema es el más pequeño (el área total sombreada) se hace mínima cuando el rectángulo KLMN es el más grande posible. Esto plantea el problema de determinar  $X_{A1}$  (o punto M en la curva) de modo que sea máxima el área de este rectángulo.

### Maximización de rectángulos

Como se observa en la Figura 7a se construye un rectángulo entre los ejes x-y que toque la curva arbitraria en el punto M(x,y), el rectángulo de área máxima es el formado en 7b.

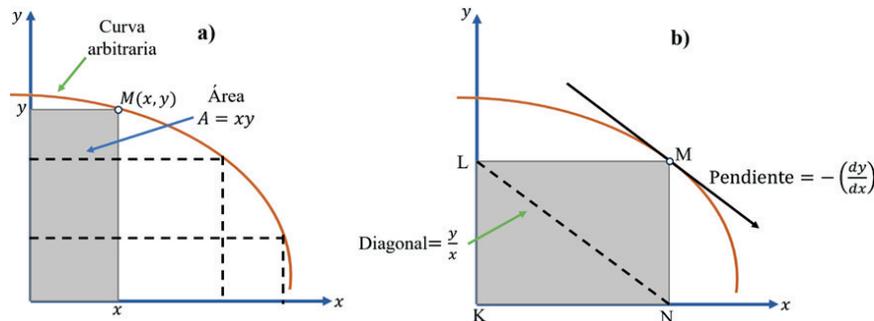


Figura 7 Procedimiento gráfico para maximiza el área de un rectángulo inscrito dentro de una curva arbitraria. a) El área del rectángulo es la base (x) por su altura (y), b) cuando la diagonal LN es igual a la pendiente a la curva sobre el punto M el área es máxima.

El área del rectángulo es:

$$A=xy \quad (6)$$

Diferenciando la ecuación (5):

$$dA=xdy+ydx \quad (7)$$

El área es máxima cuando  $dA=0$ , por lo tanto, agrupando las diferenciales:

$$-\frac{dy}{dx} = \frac{x}{y} \quad (8)$$

Con base en el análisis matemático de la ecuación (7) esta condición indica que el área del rectángulo KLMN es máxima cuando M es el punto en que la pendiente de la curva es igual a la pendiente de la diagonal NL del rectángulo. Dependiendo de la forma de la curva, podría existir más de un punto que cumple con esta condición, o también podría no haber ningún punto que sea “el mejor” (Szepe & Levenspiel, 1967).

La relación óptima de tamaños para dos reactores de tanque agitado en serie se alcanza cuando la pendiente de la curva de rapidez en M es igual a la diagonal NL. El mejor valor de M se muestra en la figura 8 y determina la conversión intermedia  $X_{A1}$  así como el tamaño de las unidades que se necesitan.

El procedimiento anterior puede extenderse directamente a operaciones de múltiples etapas.

**Ejemplificación. Comparación de los volúmenes óptimos en una batería de reactores RTA en serie**

En un reactor de Tanque Agitado se lleva a cabo una reacción de segundo orden, con una conversión mínima del 87.5% y  $C_{A0}=C_{B0}$  0.08 M. Al reactor ingresan los reactantes con un caudal volumétrico 0.28 L/min

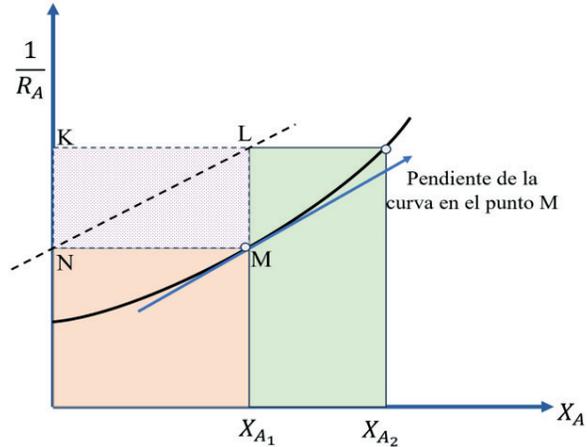


Figura 8 Maximización de rectángulos aplicada al cálculo de la conversión óptima intermedia y los tamaños óptimos de dos reactores de tanque agitado en serie. El volumen de las unidades es el menor cuando el área del rectángulo KLMN es la mayor



$$R_A = (0.00992 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}) C_A C_B \quad (9)$$

- a) Calcular el tamaño de un reactor de Tanque Agitado.
- b) Calcular el tamaño de dos reactores RTA de volúmenes óptimos.
- c) Calcular el tamaño de tres reactores RTA de volúmenes óptimos.
- d) Calcular el tamaño de cuatro reactores RTA de volúmenes óptimos.

**Solución**

Inciso a)

La ecuación de diseño de un reactor RTA es:

$$V = \frac{X_A}{(1-X_A)^2} \left( \frac{Q_0}{C_{A0}k} \right) \quad (10)$$

$$V = 329.54 \text{ L}$$

Inciso b)

Para resolver este inciso lo primero que tenemos que hacer es visualizar los puntos de operación de los reactores y esto se visualiza en la gráfica  $\left(\frac{1}{R_A}\right)$  función de  $X_A$ . En este caso, lo único que conocemos es el pun-

to de operación del reactor 2,  $X_{A_2} = 0.875$ . Sin embargo, sabemos que debe de existir una conversión intermedia,  $X_{A_1}$ , pues es la conversión obtenida del primer reactor.

Ubicados los puntos de operación de los reactores, procedemos a trazar los rectángulos, y de esta manera ubicaremos el rectángulo formado entre estos puntos de operación que es el que debemos maximizar.

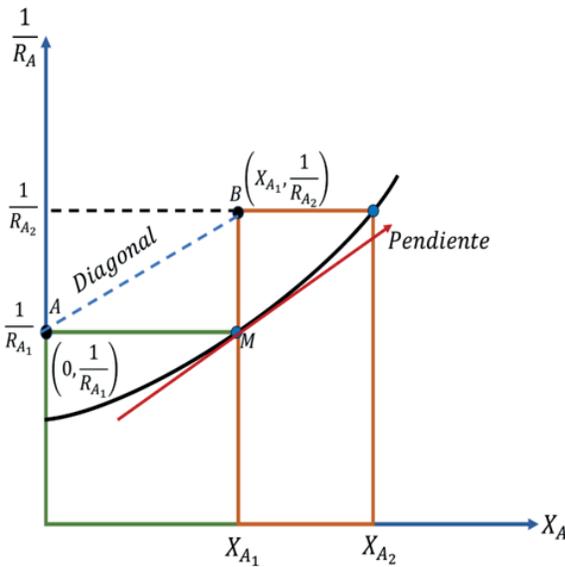


Figura 9 Coordenadas de la diagonal formada AB entre los puntos de operación de los dos reactores y la pendiente al punto M de la curva de Levenspiel.

Como mencionamos anteriormente, este rectángulo tiene una diagonal formada por los puntos A-B de la Figura 9, para determinar el volumen total óptimo esta diagonal debe ser igual a la pendiente de la recta tangente en el punto M, es decir, la derivada.

Continuamos ubicando las coordenadas de la diagonal A  $(0, \frac{1}{R_{A1}})$  y B  $(X_{A1}, \frac{1}{R_{A2}})$ .

Así podemos determinar la pendiente de la línea recta diagonal A-B

$$m_{\text{Diagonal}} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \quad (11)$$

Sustituyendo en (11) los valores de las

coordenadas de los puntos AB se tiene la expresión:

$$m_{\text{Diagonal}} = \frac{\frac{1}{R_{A2}} - \frac{1}{R_{A1}}}{X_{A1}} \quad (12)$$

Obtenida esta expresión matemática, la siguiente expresión que nos falta encontrar es la pendiente de la recta tangente al punto M en la curva, este se encuentra en el punto de operación  $X_{A1}$ , y debido a que es una derivada podemos expresarlo de la siguiente manera:

$$\text{Pendiente} = \frac{d}{dX_{A1}} \left[ \frac{1}{R_{A1}} \right] \quad (13)$$

Se sustituye en (13) la ecuación cinética (9)

$$\text{Pendiente} = \frac{d}{dX_{A1}} \left[ \frac{1}{R_{A1}} \right] = \frac{d}{dX_{A1}} \left[ \frac{1}{0.00992 C_{A1}^2} \right] \quad (14)$$

Como el diferencial es  $dX_{A1}$  hay que dejar expresada la concentración que sale del primer reactor ( $C_{A1}$ ) como función de la conversión obtenida en el primer reactor ( $X_{A1}$ ) con base en la ecuación (15):

$$C_{A1} = C_{A0}(1 - X_{A1}) \quad (15)$$

Sustituyendo (15) en (14):

$$\text{Pendiente} = \frac{d}{dX_{A1}} \left[ \frac{1}{0.00992 C_{A0}^2 (1 - X_{A1})} \right]$$

Derivando esta última expresión se tiene:

$$\text{Pendiente} = \frac{2}{k C_{A0}^2 (1 - X_{A1})^3} \quad (16)$$

Entonces, teniendo la expresión matemática de la diagonal y la pendiente de la recta tangente del punto M a la curva, con base en la ecuación (8) al igualar (12) con (16) se tiene la condición del mínimo volumen para los reactores RTA en serie.

$$\frac{\frac{1}{R_{A2}} - \frac{1}{R_{A1}}}{X_{A1}} = \frac{2}{k C_{A0}^2 (1 - X_{A1})^3} \quad (17)$$

Reactor	X <sub>A</sub>	C <sub>A</sub> (M)	RA (M s <sup>-1</sup> )	I/RA (s M <sup>-1</sup> )	Diagonal	Pendiente	Diagonal-Pendiente	V (L)	V total (L)
0	0	0.08	6.349E-05	1.575E+04					
1	0.7015392	0.023876865	5.655E-06	1.768E+05	1184885.43	1184885.563	-0.13431616	46.64160727	112.3888499
2	0.875	0.01	9.920E-07	1.008E+06				65.74724265	

Figura 10 Hoja de cálculo para determinar el volumen óptimo de un sistema de dos reactores de tanque agitado en serie.

Teniendo como incógnita  $\frac{1}{R_{A1}}$ , porque no conocemos la conversión obtenida del primer reactor  $X_{A1}$ , es decir,  $\frac{1}{R_{A1}}$  es función de  $X_{A1}$ , por lo tanto, esta ecuación debe ser resuelta para  $X_{A1}$ .

Para resolver este problema recurriremos a la utilización de SOLVER en el programa Excel. Empezamos vaciando los datos del problema, como se muestra en la Figura 8b.

Para hallar  $X_{A1}$ , supondremos un valor en la celda C08. El valor supuesto tiene que ser menor a  $X_{A2} = 0.875$ , puesto que no puede existir una conversión mayor en la parte intermedia del sistema. Se elige arbitrariamente  $X_{A1} = 0.5$ . A cada valor de conversión se procede a calcular la concentración de salida de cada reactor mediante la ecuación (18).

$$C_{Ai} = C_{Ao} (1 - X_A) \quad (18)$$

Y posteriormente la rapidez a la salida de cada reactor:

$$R_{Ai} = k C_{Ai}^2 \quad (19)$$

En la Columna F se calcula la inversa de la rapidez, y posteriormente en la Columna G calculamos la expresión matemática de la diagonal.

En la Columna H se realiza el cálculo de la pendiente de la recta tangente en un punto de la curva (figura 9). Como se desea obtener el volumen óptimo del sistema de dos reactores CSTR en serie, en-

tonces debemos realizar la maximización del rectángulo, para ello  $m_{Diagonal}$  y  $\frac{d}{dX_{A1}} \left[ \frac{1}{R_{A1}} \right]$  deben ser iguales en tal caso la resta debe ser igual a 0, por ejemplo, en la celda I8 se coloca “=G8-H8”.

Esta condición permite variar la conversión de  $X_{A1}$  de tal manera que cuando se encuentre el valor “mejor” de  $X_{A1}$  este reemplazara a el supuesto en un principio en la celda C8.

Se marca la celda I8 en la hoja de cálculo, se va al menú DATOS, y se selecciona SOLVER. Aparecerá la ventana de la Figura 11. Se marca “I8” como celda objetivo. Después se selecciona la opción VALOR DE: y se coloca un 0. Se marca C8 como la celda que ha de cambiar.

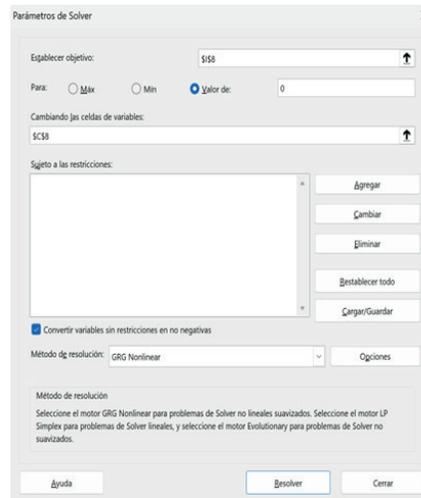


Figura 11 Ventana de la herramienta SOLVER en Excel para la determinación de la conversión intermedia X<sub>A1</sub> que optimiza los volúmenes de los dos RTA en serie. De este modo se ordena a SOLVER que re-

suelva la resta y que esta de un valor muy cercano a 0, cambiando el valor supuesto de la celda C08. Se hace clic en RESOLVER. Después de breves momentos SOLVER encuentra los valores de 1184885.43 y 1184884.536 en las celdas G8 y H8, respectivamente, con ello la resta de la celda I8 tiene un valor relativamente cercano a 0 (figura 10). La celda C8 dice que  $X_{A_1} = 0.70153$ .

De esta manera se ha obtenido la conversión del primer reactor y ahora se calcula el volumen de cada recipiente (ec. 20) que es el óptimo requerido para este sistema de dos reactores CSTR en serie

$$V_i = C_{A_0} Q_0 \left( \frac{X_{A_i} - X_{A_{i-1}}}{R_{A_i}} \right) \quad (20)$$

Con esta ecuación se calculan los volúmenes de cada reactor (columna J de la figura 10).

Para más de dos reactores se puede generalizar la ecuación de la diagonal del rectángulo externo formado y la pendiente de la recta tangente al punto de cada conversión intermedia.

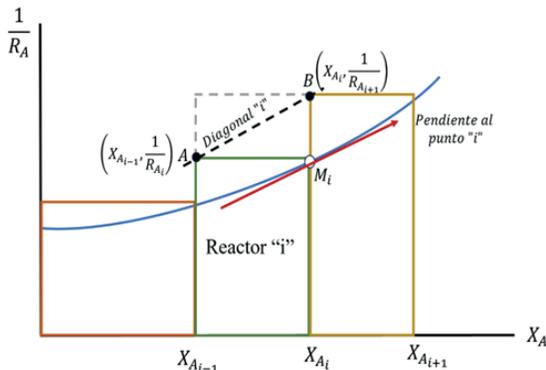


Figura 12 Generalización para las coordenadas de la diagonal AB del reactor “i” en el punto Mi tangente a la curva.

Por lo tanto, la ecuación generalizada de la diagonal del reactor i es:

$$m_{Diagonal\ i} = \frac{\frac{1}{R_{A_{i+1}}} - \frac{1}{R_{A_i}}}{X_{A_i} - X_{A_{i-1}}} \quad (21)$$

Mientras que la pendiente de la recta tangente al punto  $M_i$  es:

$$Pendiente_i = \frac{2}{kC_{A_0}^2(1-X_{A_i})^3} \quad (22)$$

Para un sistema de tres reactores RTA en serie hay dos conversiones intermedias que hay que hayas tal que se cumplan de manera simultánea las ecuaciones 21 y 22 para el reactor 1 y el 2.

En la figura 13 se muestra la hoja de cálculo para un sistema de tres reactores de tanque agitado en serie, ahora hay dos conversiones intermedias  $X_{A_1}$  y  $X_{A_2}$  las cuales han se ser encontradas por SOLVER, ahora hay que resolver de manera simultánea las ecuaciones 21 y 22 para el reactor 1 y el reactor 2 (columnas G y H de la figura 13).

El algoritmo es el mismo que ya se ha descrito para utilizar el SOLVER. La opción de ESTABLECER OBJETIVO solo acepta una celda y de deja la misma que en figura 11 (celda \$I\$8), pero ahora hay que cambiar las dos celdas de las conversiones intermedias (\$C\$8: C\$9) correspondientes a  $X_{A_1}$  y  $X_{A_2}$ . Asimismo, la ecuación 21 y 22 se deben cumplir para el reactor 2, por lo tanto hay que agregar como restricción que la celda \$I\$9

Reactor	Xa	CA (M)	RA (M s <sup>-1</sup> )	1/RA (s M <sup>-1</sup> )	Diagonal	Pendiente	Diagonal-Pendiente	V (L)	V total (L)
0	0	0.08	6.349E-05	1.575E+04					
1	0.5842116	0.03263074	1.098E-05	9.111E+04	438249.25	438249.2504	-0.001824299	20.01343255	
2	0.786099	0.017040878	2.881E-06	3.471E+05	3259360.38	3259360.301	0.077335801	26.46743444	79.83986788
3	0.875	0.01	9.920E-07	1.008E+06				33.35900089	

Figura 13 Hoja de cálculo para determinar el volumen óptimo de un sistema de tres reactores de tanque agitado en serie.

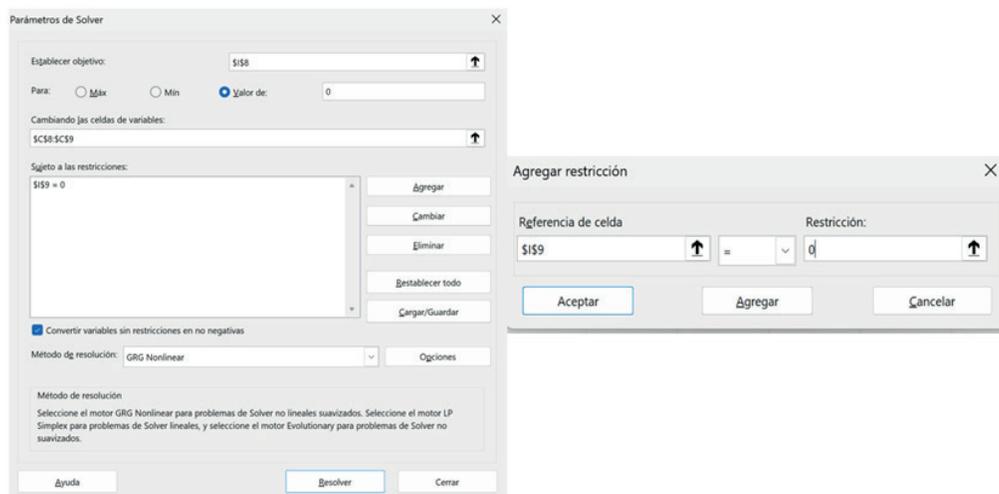


Figura 14 Ventana de SOLVER para la resolución de tres reactores RTA en serie, para un sistema de más de dos reactores hay que colocar restricciones para que la columna I tome un valor de cero.

también valga cero pero hay que ponerla como restricción

Sistema de reactores	Volumen total [L]
Un solo reactor RTA.	329.54
Un solo Reactor PFR	41.2
Dos reactores óptimos RTA	111.6
Tres reactores óptimos RTA	79.2

Tabla 1 Resultados obtenidos para cada sistema de reactores.

Como se observa en la tabla 1 a mayor cantidad de unidades en serie el volumen óptimo disminuye, para una mayor cantidad de unidades en serie la disminución del volumen se observa en la figura 15.

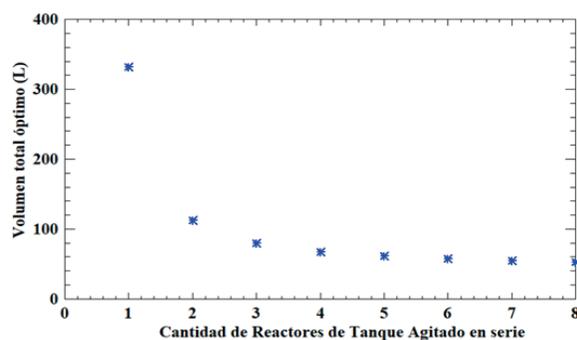


Figura 15 Disminución del volumen total óptimo como función de la cantidad de reactores de tanque agitado en serie.

## Conclusiones

Se presentó una estrategia didáctica para la optimización del tamaño de reactores de tanque agitado en serie, mediante el método de rectángulos para poder determinar el arreglo más conveniente de reactores de diferente tamaño en un proceso con reacciones químicas y con un determinado grado de conversión, se ejemplificó también su aplicación en la comparación de volúmenes para reactores RTA en serie de diferente tamaño y su respectiva solución con ayuda del solver de Excel. Pretendemos con esto ayudar a lograr aprendizajes significativos y una mejor comprensión por parte de los estudiantes que cursan Cinética Química y Principios de Diseño de Reactores, de este tema que con base en nuestra experiencia docente es de dificultad para la mayoría de quienes la cursan.

## Bibliografía

- [1] Castellan, W. G. (1998) *Fisicoquímica*, Adisson-Wesley Iberoamérica, 2 Ed. USA.
- [2] Chorkendorff, I.; Niemantsverdried, J. W. (2007) *Concepts of modern catalysis and kinetic*. 2nd ed. Wiley VCH. Alemania.

- [3] Dashi, A., Khorsand, K., Marvast, M. A. & Kakavand, M. (2006). *Modeling and simulation of ammonio synthesis reactor*. Petrol. Coal. 48 (2) 15-23.
- [4] Elizadle, I., Ramírez, R. & Ancheyta, J. (2013). Analytical solution to obtain the optimal volumen of a series of continuous tank reactors sustaining a first order reaction. *Avances en ciencias e Ingeniería*. 4 (2) 51-60.
- [5] Espenson, J. H. (1995) *Chemical kinetics and reaction mechanisms*, McGraw-Hill, 2 ed. México.
- [6] Fogler, S. H. (2010) *Essentials of chemical reaction engineering*, Pearson Prentice Hall, 5 ed. USA.
- [7] Froment. G. F. & Kenneth, B. B. (2010) *Chemical reactor analysis and design*, John Wiley & Sons, 3 ed. USA.
- [8] Green, D. W.; Southard, M. Z. (2019) Perry's *Chemical Engineers' Handbook*, 9th Edition. McGraw-Hill Education.
- [9] Hong, R., Li, X., Li, H. & Yuan, W. (1997) Modeling and simulation of SO<sub>2</sub> oxidation in a fixed reactor with periodic Flow reversal. *Catal. Today*. 38, 47-58.
- [9] Levenspiel, O. (2010) *Ingeniería de las reacciones químicas*, Limusa Wiley, 3 ed. México.
- [10] Szépe, S., Levenspiel, O. (1967) Optimal temperatura pólíces for reactors sub- jet to catalyst deactivation-I Batch Reactor. *Chem. Eng. Sci.* 23, 881-894.



# **Santo llamando a Blue Demon: incorporación de nuevas tecnologías para estudiar la morfología de los corales**

**Mtro. Sergio D. Guendulain-García<sup>1</sup>**

**Dr. Andrés López-Pérez<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Doctorado en Ciencias Biológicas y de la Salud,  
Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México.*

*<sup>2</sup>Laboratorio de Arrecifes y Biodiversidad (ARBIOLAB)/Laboratorio  
de Ecosistemas Costeros, Universidad Autónoma Metropolitana.*

**Resumen**

El tamaño y forma de las colonias de coral define en gran medida la función que estas desempeñan en el ecosistema arrecifal generando, por ejemplo, más refugio. La construcción y el análisis realizados a partir de modelos tridimensionales de corales ha permitido, entre otras cosas, cuantificar el grado de complejidad estructural de estos organismos y realizar aproximaciones respecto a la función estructural de los mismos. El presente trabajo hace un breve relato del estudio de la forma, de las necesidades de estudiar la forma de los corales en tres dimensiones, y de la incorporación de herramientas que facilitan su estudio.

**Palabras clave:** Complejidad estructural, corales, funcionalidad.

**Abstract**

Coral size and shape defines their function in the reef ecosystem, determining, for example, the among and type of shelter for associate organisms. The construction and analysis of three-dimensional (3D) coral models has allowed, among other things, to quantify the structural complexity of these organisms and to make approximations of their function. Here we discuss the importance of the determination of shape complexity in corals and provide a brief history of coral shape study as well as the incorporation of new technologies.

**Key words:** structural complexity, corals, functionality

El término arrecife de coral ha ganado popularidad; de manera constante son estrellas de documentales y películas que a más de uno le han hecho derramar lágrimas, pero su aparición en televisión,

radio y prensa escrita en particular con noticias relacionadas con su deterioro y con el cambio climático, los han puesto en boca de todos. Por ejemplo, si hacemos una búsqueda en Google utilizando el término “arrecifes de coral” arrojaría unos cinco millones de resultados; desde información altamente especializada, hasta la relacionada con dibujos animados (ie. Buscando a Nemo).

Los principales responsables de la formación de arrecifes son los corales que al crecer depositan cristales de carbonato de calcio que forman la materia prima para la construcción de estos ecosistemas. Los corales son, tal vez, uno de los organismos más peculiares de la naturaleza puesto que parecieran haber salido de una historia mítica: poseen atributos de piedras, de plantas y, a la vez, de animales. De manera adicional, estos animales presentan una amplia diversidad de formas, desde las relativamente simples que siguen la configuración del sustrato donde se desarrollan y esféricas, hasta las más complejas como los corales con morfologías ramificadas (Figura 1). La diversidad morfológica de los corales es de tal magnitud, que si la identificación de estos organismos solo dependiera de las características morfológicas del esqueleto sería difícil ubicarlos en un solo grupo. La combinación de formas y abundancia de estos organismos han logrado que, por cientos, miles y millones de años los arrecifes desarrollen complejas estructuras.

La complejidad estructural es uno de los atributos más importantes en la naturaleza. A escala geomorfológica y producto de cientos de miles o millones de años, podemos apreciar complejos de montañas y cañones de distintas formas y dimensiones; a

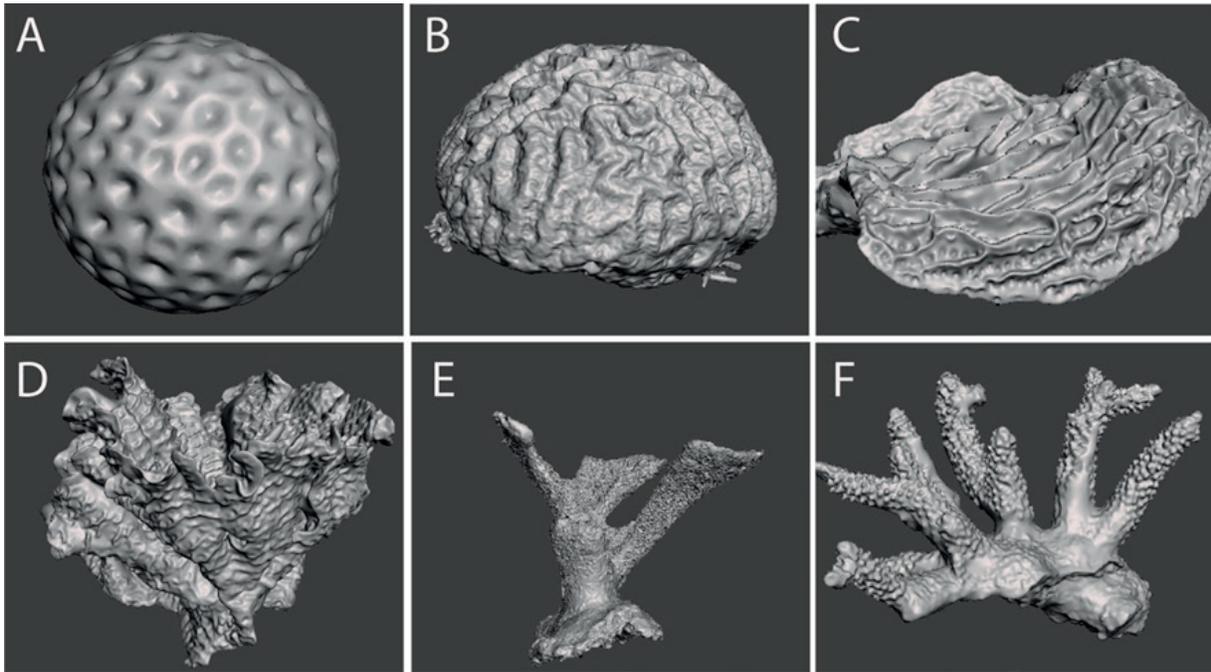


Figura 1. Modelos 3D que ejemplifican la variación en la morfología de los corales en seis especies: A) *Siderastrea radians*, B) *Pseudodiploria strigosa*, C) *Undaria agaricites*, D) *Undaria tenusfolia*, E) *Acropora palmata*, F) *Acropora cervicornis*

escala más pequeña podemos atestiguar la rugosidad de la corteza de los árboles. En arrecifes de coral, la complejidad estructural es tal que promueve la biodiversidad, abundancia y biomasa de especies asociadas, lo que convierte a los arrecifes de coral en centros de muy alta diversidad igualando, y en algunos casos, superando la diversidad observada en las selvas tropicales.

Desde tiempos remotos y aun sin haber recibido una educación formal, hemos sido capaces de reconocer formas en la naturaleza. Aunque el reconocimiento y análisis de las formas pudiera haber ocurrido de manera independiente en varias culturas antiguas, debemos a Pitágoras (569 a.C) la formalización del método para cuantificar la forma de un triángulo.

Sin embargo, la determinación de atributos de cuerpos irregulares no ha resultado ser una tarea sencilla y ha representado

un reto importante desde el origen de los estudios científicos. La leyenda cuenta que Arquímedes (287 a.C) resolvió como obtener volúmenes de cuerpos irregulares cuando tomaba, lo que suponemos era, un placentero baño de tina. Arquímedes, tras pronunciar Eureka, espeto en griego algo más o menos así: “todo cuerpo que se sumerge en un líquido experimenta un empuje de abajo hacia arriba proporcional al peso del volumen del líquido desalojado” (Tomado de: La Gallina Dijo Eureka, Les Luthiers). Con esto, poco más de dos siglos atrás, la cuantificación de volúmenes de cuerpos con formas complejas habría sido resuelta, pero faltaba generar métodos para determinar numerosos atributos morfológicos de cuerpos irregulares.

En corales, las primeras aproximaciones a la estimación del área superficial consistieron en métodos invasivos como envolver fragmentos de coral en papel alumi-

nio para después pesarlo y aproximar el área con una curva de calibración (eso vs área). Sin embargo, a partir del año 2000 y gracias al avance tecnológico, se tuvo la capacidad de representar colonias de coral en tres dimensiones (3D), abriendo la puerta a determinar no solo medidas relacionadas con las tallas de los corales, sino también la oportunidad de cuantificar atributos relacionados con la forma de estos organismos (Zawada et al. 2019).

La digitalización 3D consiste en la representación de objetos en un plano de tres dimensiones (x, y, z). Los objetos son descritos por medio de una serie de triángulos (Gracias Don Pitágoras) interconectados por sus vértices en forma de red, de tal forma que cada triángulo posee una posición x, y, z en el espacio; el arreglo de estos triángulos se organiza en una matriz de numerosas columnas y renglones. Es a partir del análisis matemático de esta matriz, que podemos cuantificar atributos de talla y forma de objetos incluso con formas irregulares.

A pesar de que el empleo de las tomografías computarizadas (CT por sus siglas en inglés) sea hasta el momento la técnica más precisa para la obtención de modelos 3D (Veal et al., 2010), las técnicas más populares y accesibles para el estudio de corales y arrecifes han sido la fotogrametría y el empleo de los escáner 3D.

La fotogrametría consiste en la construcción de objetos 3D a partir de imágenes bidimensionales que se superponen en un 70-80%. Un software especializado identifica características similares en las imágenes y las ordena de acuerdo con la posición en que fueron tomadas, a partir de lo cual se identifican puntos de coincidencia (nube de puntos dispersa); finalmente, mediante un algoritmo se reconstruye el objeto en 3D

(Anelli et al. 2019). Por su parte, los escáneres 3D proyectan patrones determinados de luz (láser o visible) sobre los objetos, un sensor captura la luz reflejada y a partir de la diferencia entre la luz emitida por el escáner y la recibida por el sensor, se recrean las irregularidades producto de la forma de los objetos. Es, justamente, la diferencia en los patrones de luz que permite recrear el objeto en 3D (Rocchini et al. 2001).

A partir de la digitalización 3D de corales se han determinado las dimensiones de colonias para, por ejemplo, medir tasas de crecimiento en corales (Lange and Perry 2020), atributos poblaciones (Hernández-Landa et al., 2020), y la manera en que avanzan enfermedades (Meiling et al. 2020; Combs et al. 2021). Adicionalmente, ha sido empleada para medir atributos de complejidad estructural como la rugosidad superficial de las colonias (Reichert et al. 2017; Fukunaga et al. 2019), la relación entre la complejidad estructural y la generación de refugio (Ferrari et al. 2017; Fukunaga et al. 2019; Urbina-Barreto et al. 2021) y describir el espacio funcional creado por la variación en formas de los corales (Zawada et al. 2019).

En ecología, la función de un organismo ha sido recientemente empleada para describir la relación entre los rasgos (atributos) de los organismos (¿cómo es el organismo?) y el rol o función que estos atributos desempeñan en el ecosistema (Bellwood et al. 2019). Una de las principales funciones atribuidas a la complejidad de los corales, es la generación de refugio para organismos que habitan los arrecifes. Así pues, atributos tal como el tamaño, así como la forma de corales genera hábitats específicos que influyen en la cantidad, la talla y el tipo de organismos asociados (Figura 2). Cuantificar, por lo tanto, la complejidad estructural



Figura 2. Generación de refugios específicos relacionados con la talla y la formade las colonias de coral. A) *Acropora cervicornis* B) *Porites Porites* C) *Acropora palmata* D) *Dendrogyra cylindrus* e) *Orbicella annularis*. (créditos fotográficos A, D: Michael Del Rosario. B: Kevin Novelo. C, E, F: Guendulain).

provee información importante sobre la funcionalidad de cada colonia/tipo de coral, así como su importancia para el ecosistema en su totalidad.

No hace muchos años, niñas, niños y adultos por igual, nos maravillaba que el Santo, El Enmascarado de Plata se co-

municase con Blue Demon a través de su reloj de pulsera (Santo llamando a Blue Demon.....). La generación de imágenes 3D para el estudio de los corales produce el mismo asombro que el mítico reloj pulsera. Pitágoras, Arquímedes y numerosos científicos alrededor del mundo, deben de maravillarse de las posibilidades que trae

la incorporación del análisis de imágenes en 3D, al estudio de corales y arrecifes.

De manera particular, la posibilidad de describir cuantitativamente la complejidad estructural a nivel colonia, así como a nivel de arrecife resulta de gran importancia para entender los cambios potenciales, que el Cambio Climático, ocasionara en las funciones estructurales provocadas por la pérdida de especies clave en el arrecife, y así pavimentar el camino hacia su posible recuperación. El uso de estas nuevas herramientas 3D es relativamente nuevo, sin embargo es innegable su potencial en el estudio de los arrecifes de coral, con esto se han abierto nuevas líneas de investigación que están reponiendo importantes preguntas sobre la ecología, fisiología y la funcionalidad de los corales.

### Agradecimientos

Este trabajo forma parte del marco teórico del proyecto de doctorado de SDGG, sin embargo, la conceptualización completa no hubiera sido posible sin la adquisición, procesamiento y análisis de cerca de 800 modelos 3D de corales. Agradecemos a todas las instituciones y personas que hicieron posible este trabajo. De manera particular agradecemos al Smithsonian National Museum of Natural History, al Museo Nacional de Historia Natural de la República Dominicana y a El Colegio de la Frontera Sur por el acceso a sus colecciones de corales. A la Fundación Dominicana de Estudios Marinos (FUNDEMAR), por facilitar, equipo, insumos y salidas de campo. Así mismo, agradecemos a la Dr. Andrea Quattrinny, Carlos Zuriel, Patricia Torres Pineda y al Dr. Miguel Ángel Ruiz Zárate por su ayuda durante la consulta a las colecciones. También agradecemos a Alido Luis Baez, Juan Adrien Profet, Eduardo Ávila, Diego García Medrano, Michael Del

Rosario, y Rebeca García Campos por su asistencia en el trabajo de campo. El procesamiento de los modelos 3D se logró gracias al apoyo de Eduardo Ramírez-Chávez, Kyle Zawada, Cuauhtémoc Aparicio Cid, Ruben Olmo Gilabert, y Fernando Pardo. El título de este documento surgió gracias a discusiones con Camila Valverde sobre la morfología de los corales y las herramientas para aproximarla. SDGG recibió apoyo económico por parte del Smithsonian Institution's Kenneth Jay Boss Fellowship, por parte de IBEROSTAR-Wave of change, y recibió una beca por parte de CONACYT (no. 331792).

### Referencias bibliográficas

- Anelli, M., Julitta, T., Fallati, L., Galli, P., Rossini, M., & Colombo, R. (2019). Towards new applications of underwater photogrammetry for investigating coral reef morphology and habitat complexity in the Myeik Archipelago, Myanmar. *Geocarto International*, 34(5), 459–472. <https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1408703>
- Bellwood, D. R., Streit, R. P., Brandl, S. J., & Tebbett, S. B. (2019). The meaning of the term 'function' in ecology: A coral reef perspective. In *Functional Ecology* (Vol. 33, Issue 6, pp. 948–961). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13265>
- Combs, I. R., Studivan, M. S., Eckert, R. J., & Voss, J. D. (2021). Quantifying impacts of stony coral tissue loss disease on corals in Southeast Florida through surveys and 3D photogrammetry. *PloS One*, 16(6), e0252593. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252593>
- Ferrari, R., Figueira, W. F., Pratchett, M. S., Boube, T., Adam, A., Kobelkowsky-Vidrio, T., Doo, S. S., Atwood, T. B., & Byrne, M. (2017). 3D photogrammetry quantifies

- growth and external erosion of individual coral colonies and skeletons. *Scientific Reports*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16408-z>
- Fukunaga, A., Burns, J. H. R., Craig, B. K., & Kosaki, R. K. (2019). Integrating three-dimensional benthic habitat characterization techniques into ecological monitoring of coral reefs. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7 (2), 27. <https://doi.org/10.3390/jmse7020027>
- Hernández-Landa, R. C., Barrera-Falcon, E., & Rioja-Nieto, R. (2020). Size-frequency distribution of coral assemblages in insular shallow reefs of the Mexican Caribbean using underwater photogrammetry. *PeerJ*, 8, e8957. <https://doi.org/10.7717/peerj.8957>
- Lange, I. D., & Perry, C. T. (2020). A quick, easy and non-invasive method to quantify coral growth rates using photogrammetry and 3D model comparisons. *Methods in Ecology and Evolution*, 11 (6), 714–726. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13388>
- Meiling, S., Muller, E. M., Smith, T. B., & Brandt, M. E. (2020). 3D photogrammetry reveals dynamics of Stony Coral Tissue Loss Disease (SCTLD) lesion progression across a thermal stress event. *Frontiers in Marine Science*, 7, 597643. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.597643>
- Reichert, J., Backes, A. R., Schubert, P., & Wilke, T. (2017). The power of 3D fractal dimensions for comparative shape and structural complexity analyses of irregularly shaped organisms. *Methods in Ecology and Evolution*, 8 (12), 1650–1658. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12829>
- Rocchini, C., Cignoni, P., Montani, C., Pingi, P., & Scopigno, R. (2001). A low cost 3D scanner based on structured light. *Computer Graphics Forum*, 20 (3), 299–308. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00522>
- Urbina-Barreto, I., Chiroleu, F., Pinel, R., Fréchon, L., Mahamadaly, V., Elise, S., Kulbicki, M., Quod, J. P., Dutrieux, E., Garnier, R., Henrich Bruggemann, J., Penin, L., & Adjeroud, M. (2021). Quantifying the shelter capacity of coral reefs using photogrammetric 3D modeling: From colonies to reefscales. *Ecological Indicators*, 121, 107151. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107151>
- Veal, C. J., Holmes, G., Nunez, M., Hoegh-Guldberg, O., & Osborn, J. (2010). A comparative study of methods for surface area and three dimensional shape measurement of coral skeletons. *Limnology and Oceanography: Methods*, 8 (MAY), 241–253. <https://doi.org/10.4319/lom.2010.8.241>
- Zawada, K. J. A., Dornelas, M., & Madin, J. S. (2019). Quantifying coral morphology. *Coral Reefs*, 38 (6), 1281–1292. <https://doi.org/10.1007/s00338-019-01842-4>

# Ética e Inteligencia Artificial



**M. C. Alma E. Martínez Licona**  
*Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa*

**Resumen:**

Actualmente la Inteligencia Artificial (IA) ha dado mucho de qué hablar, con herramientas como el ChatGPT o aplicaciones que usan la IA para modificar fotos, o igualar la voz de alguna persona para cometer algún acto ilícito, se empieza a considerar estas técnicas como dañinas para la sociedad, si estas no son creadas y usadas con ética.



La Inteligencia Artificial (IA) son diferentes técnicas que se programan, convirtiéndose en algoritmos o aplicaciones que se pueden usar en cualquier campo. Por ejemplo, en el sector salud, tenemos el aprendizaje maquina que usa bases de datos generadas por algunas organizaciones con imágenes médicas, registros de pacientes, registros de procedimientos usados en los pacientes, así como los resultados obtenidos al aplicarlos, y con toda esta información se puede analizar y descubrir patrones que a los médicos les costaría mucho encontrar pero que les ayuda en la toma de decisiones para realizar un diagnóstico médico y cómo atacar el padecimiento diagnosticado.

De la misma manera que en el sector salud, el aprendizaje maquina también se puede aplicar en bases de datos financieros, se pueden descubrir patrones y tomar decisiones para inversiones con una velo-

cidad y precisión increíbles, reduciendo errores en los pronósticos financieros.

¿Qué sucede en el arte? Es la misma historia, los algoritmos de Inteligencia Artificial se alimentan de una base de datos, por ejemplo, de imágenes, o si se piensa en música, de sonido y a partir de estas bases de datos se genera una imagen o melodía “nueva”.

Otra aplicación con el aprendizaje maquina es la creación del procesamiento del lenguaje natural, el cual es el proceso de comprender un comando que se le da a la máquina en el lenguaje natural. Es decir, la computadora nos entiende, con el aprendizaje maquina se extrae la intención y la información contenida en el lenguaje natural y lo traducen a una estructura que se puede tratar en un programa informático. Con esto podemos hacer dictados a nuestra computadora, a nuestro celular, o por medio de nuestra voz encender la luz de la casa o el televisor.

Y no dejemos de lado al tan conocido ChatGPT, que ha asombrado a más de uno al ver que puede responder cualquier pregunta de cualquier tema en específico.

Sin embargo, no importa el campo en el que pensemos: salud, finanzas, arte, agricultura, etc. los algoritmos necesitan de una base de datos, grande y robusta para poder encontrar patrones y a partir de esos datos generar información. Y esa base de datos la generan humanos. Esos algoritmos no podrían ser tan eficientes si las bases de datos fueran erróneas. Si estos algoritmos nos dan respuestas que nosotros sabemos que son equivocadas y se lo hacemos saber, dando la respuesta correcta, al darla estamos contribuyendo al entrenamiento de esos algoritmos para mejorar su capacidad de respuesta.

Es obvio que esos algoritmos no existirían sin la ayuda de los humanos, y al decir, que un algoritmo es capaz de encontrar patrones más rápido que un humano es porque el análisis de grandes bases de datos es muy complicado para un humano, demasiada información que llevaría muchos años poderla analizar sin el apoyo de las computadoras.

Sin embargo, como en todo, siempre hay un lado bueno y otro oscuro, y la IA no es la excepción. Los ejemplos anteriormente mencionados son una prueba del apoyo tan grande que dan estas aplicaciones a los humanos, pero somos los humanos quienes, con nuestras acciones, damos la inclinación hacia lo positivo o lo negativo a estas técnicas. Desde la decisión de la creación de estas aplicaciones, al definir su objetivo hasta el uso que le damos, tal vez el objetivo al momento de crearlas es bueno, pero quienes las usan le dan otro fin, haciendo algo creado para un objetivo bueno en un uso negativo.

Tocando este aspecto negativo, la IA ha sido usada para el acoso sexual, para las estafas, suplantación de identidad, en resumen, para cometer delitos informáticos.

Reflexionemos en el siguiente caso:

Por medio de aplicaciones que usan IA, jóvenes (a nivel secundaria y universidad) manipulan y alteran fotos de compañeras de escuela o del pueblo donde viven, haciéndolas ver desnudas, posteriormente, difunden y venden estas fotos en redes sociales. Las fotos las consiguen del perfil de redes sociales que manejan las chicas en cuestión.

- Este caso se conoció en México en el Instituto Politécnico Nacional (IPN) en la Escuela Superior de Comercio y Admi-

- nistración (ESCA), Unidad Santo Tomás
- En Almendralejo, un pueblo en el sur de España
- En Perú, en el colegio privado Saint George's (secundaria)

Otros ejemplos de problemas en el uso de la IA son:

El del 2018, año en que sucede el primer accidente mortal a un ser humano que protagonizó un vehículo autónomo de la empresa Uber, en Arizona, este accidente detonó la discusión de quién era el responsable jurídico, la empresa UBER, el dueño del vehículo, la automotriz que lo diseño o incluso si el auto que es guiado por IA podría ser responsable.

En 2019, en Hungría, se cometió el primer delito con ayuda de una IA, al realizar una simulación de la voz de un CEO para solicitar un depósito urgente de 243,000 euros entre una empresa eléctrica y un proveedor que efectivamente se realizó.

Con IA se pueden crear perfiles falsos, noticias falsas, mensajes falsos. Y si se hace una búsqueda se encontrarán más ejemplos a los mencionados, y el problema no es la evolución de la tecnología, sino, la falta de valores éticos de las personas al dar un mal uso a estas tecnologías.

Faltando un marco jurídico robusto para atender estos delitos y la falta de valores éticos en las personas el problema se complica. Recordemos que los VALORES ÉTICOS son guías del comportamiento para regular la conducta del ser humano según lo normalmente aceptado o lo socialmente correcto, es grave ver, que chicos a nivel secundaria y universidad no vean que es incorrecto manipular fotos de chicas para desnudarlas y venderlas. ¿Dónde están

esos valores éticos, que se deben aprender desde el hogar para continuar en las escuelas? ¿Dónde está el respeto a la privacidad de nuestra información?

Por lo grave de la situación, hay organizaciones que reflexionan sobre estos temas y trabajan al respecto, una de ellas es la UNESCO quien genera el documento "La ética de la Inteligencia Artificial" y en él, hace una recomendación a los Estados miembros, esta trata de las cuestiones éticas relacionadas con el ámbito de la Inteligencia Artificial en la medida en que competen al mandato de la UNESCO, el documento completo se encuentra en el siguiente link: [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381137\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381137_spa).

Por otro lado, la Unión Europea (UE) ha presentado su Propuesta de Reglamento sobre un enfoque europeo de la Inteligencia Artificial, el primer paso del que será el marco legal sobre IA en el territorio de la Unión. En el texto destaca poderosamente la catalogación del uso de la IA según el riesgo que puede suponer para los derechos fundamentales.

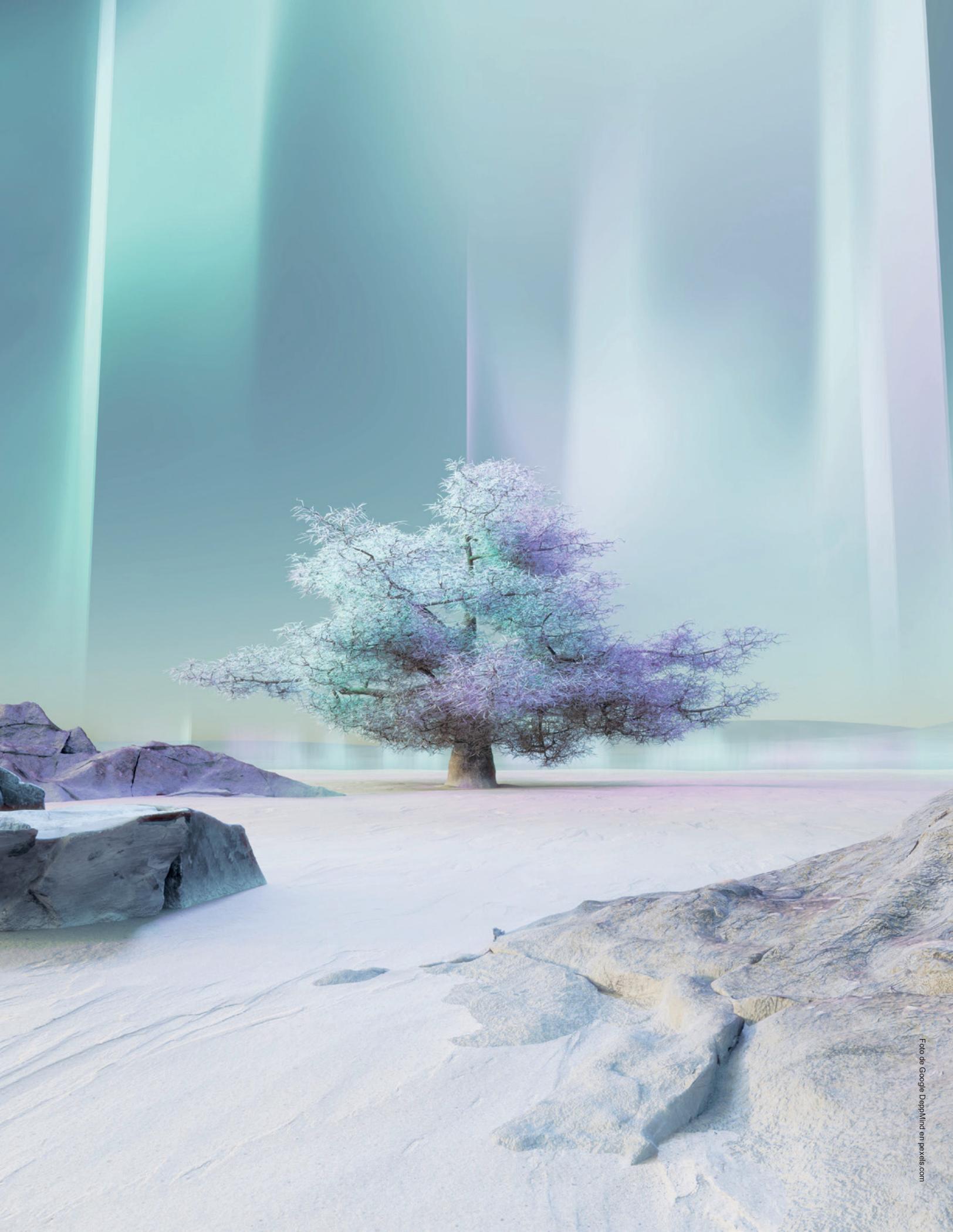
Esta Propuesta de Reglamento es un marco de discusión para desarrollar las normas definitivas, y nace con dos objetivos: garantizar el uso ético de la Inteligencia Artificial, respetando los derechos fundamentales de personas y empresas, y colocar a la UE en una posición líder a nivel internacional en esta tecnología clave.

Es importante informarnos y proporcionar a los jóvenes una visión del daño que se puede ocasionar por el mal uso de estas tecnologías, no son un juego y si se ocupan de forma errónea esto puede causar consecuencias legales.

#### **Bibliografía:**

Moran Espinosa, Alejandra. "Responsabilidad penal de la Inteligencia Artificial (IA). *¿La próxima frontera?*" Rev. IUS vol.15 no.48 Puebla, año 2022

Guzmán, Rubén. "La UE prohibirá ciertos usos de la IA por su "riesgo inadmisibles" para los derechos fundamentales". Digitalis, año 2021  
<https://www.nacion321.com/tecnologia/delitos-perpetrados-con-ia-cuales-han-sido-los-casos-mas-sonados>



*¡Felices fiestas!*

