

En memoria de Alberto López Vivas

Biografía: Nichelle Nichols, una estrella de T.V. en la NASA  
*Luis Fernando Patlan Velázquez*

Reseña: *La verde y sus verdades ¿a medias?*  
*Luis Gatica*

Noticias: Hasta la Luna, baterías de litio sobreesadas,  
sustentabilidad en el diseño y representatividad

¿Qué tanto hace Canseco con los plásticos?  
*Astron Martínez*

Breve historia del temple: de las espadas a los automóviles  
modernos  
*Helios Ocaña Ruiz, Gonzalo González Reyes  
y José María Cabrera Marrero*

Micomateriales: importados desde el reino de los hongos  
*Eduardo Hernández Navarro*

Nanocapa SakCu®: ¿Por qué inactiva a los virus?  
*Ana Martínez Vázquez, J. M. Bello López,  
P. Silva Bermudez, G. Prado, C. Ramos Vilchis,  
R. de la Torre, Gabriela Ibáñez Cervantes, Mónica Alethia  
Cureño Díaz, A. Almaguer Flores y S. E. Rodil*

Dendronización como estrategia para mejorar el desempeño  
terapéutico de sistemas moleculares  
*Luis José López Méndez, Neyra C. Cabrera Quiñones,  
Julia Cassani Hernández y Patricia Guadarrama Acosta*

El enlace de halógeno  
*Luis David Rosales Vázquez y Alejandro Dorazco González*

Endurecimiento en aleaciones de aluminio, ciclo de vida de  
precipitados  
*Sarahí Cataño Torres, Carlos Gamahel Garay Reyes  
y Roberto Martínez Sánchez*

La educación formal: entre la desigualdad educativa  
y la brecha digital en tiempos de post pandemia.  
*Jorge Alfredo Blanco Sánchez*

Thomas Harriot y Simon Stevin  
*José Luis Álvarez García*

Estudio de un proceso de biolixiviación en un  
concentrado de hierro desde el  
punto de vista reológico

*Luis Medina Torres, Diola Marina Nuñez Ramirez,  
Luis Antonio Ramirez Torres, Fausto Calderas,  
Ma. Josefa Bernad Bernad y Octavio Manero*

Nanocapa SakCu®: pruebas de  
seguridad y funcionalidad  
*C. Ramos Vilchis, E. Hernández, F. García López,  
D. Pérez y S. E. Rodil*

Propagación de luz en estructuras helicoidales  
*Adrián Reyes y Laura Olivia Palomares*

Simulaciones por computadora en el estudio de la  
Materia Condensada Blanda  
*Ana Beatriz Salazar Arriaga y Héctor Domínguez*

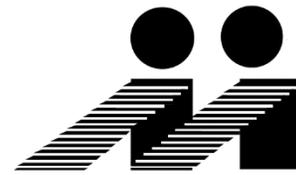
Biomateriales marinos  
*I. A. Núñez Tapia, R. M. Jiménez Jiménez  
y M. C. Piña Barba*

Primer Congreso Estatal de Ciencia  
e Ingeniería de Materiales 2022

UNAM: Cien años del muralismo mexicano  
*Dafne Cruz Porchini*

Material de apoyo a la docencia:  
Talleres de arte y ciencia





# Universidad Nacional Autónoma de México

Enrique Graue Wiechers  
**Rector**

Leonardo Lomelí Vanegas  
**Secretario General**

William Henry Lee Alardín  
**Coordinador de la Investigación Científica**

## Instituto de Investigaciones en Materiales

José Israel Betancourt Reyes  
**Director**

Ilich Argel Ibarra Alvarado  
**Secretario Académico**

Estrella Ramos Peña  
**Editora responsable**

Astron Rigel Martínez Rosas  
**Coordinador editorial y de divulgación**

### Comité Editorial:

Maricela Zapata Arroyo  
Yareli Rojas Aguirre  
Karina Suárez Alcántara  
José Chávez Carvayar  
Francisco Morales Leal  
Ateet Dutt

### Producción:

Editorial IIM  
Editor científico: Estrella Ramos Peña  
Editor digital: Omar Alejandro Pompa García  
Gráfica: Fotografías de los murales de Ciudad Universitaria  
Diseño editorial: Astron Martínez

La reproducción del material aquí mostrado se permite siempre y cuando:  
se cite esta revista, se reconozca a los autores y no sea utilizado con fines comerciales.

CDMX 10 de septiembre del 2022

# Presentación

Con mucha tristeza editamos y dedicamos este último número a la memoria de nuestro querido amigo y colaborador de esta revista, Albert, quien abandonó este mundo sin previo aviso y antes de tiempo, dejándonos mudos, sorprendidos y, sobre todo, muy, muy tristes. Fue un incansable colaborador de este proyecto. Con su ausencia perdemos mucho: un amigo, el soporte técnico capaz de resolver “lo que sea”, el eficiente compañero de trabajo que todos deseamos tener. Se marchó dejando inconclusos muchos proyectos, entre otros, la digitalización de la revista. La última vez que tuve el gusto de verlo dejó en mi computadora la primera versión de la revista en el formato Open Journal System, mismo que estaba trabajando con mucho entusiasmo. No tuvimos oportunidad de despedirnos. Aprovechamos este espacio como un tributo a su memoria y le dedicamos nuestro trabajo, como un último grito al viento para decirle adiós. Extrañaremos sus finísimos modales, su sonrisa, su excelente disposición y lo recordaremos así, siempre joven, siempre amable, inteligente, dispuesto y sonriente. Descanse en paz nuestro querido Albert.

Además de la tristeza que nos embarga por la partida de nuestro amigo, de manera personal yo también quiero expresar mi tristeza por otro motivo: el número que ahora ponemos en sus manos es el último de una etapa de la revista. El último en el que una servidora colabora para este comité editorial. Todo llega a su fin y es importante dar paso a nuevas ideas y nuevos proyectos. Doy las gracias al director de nuestro instituto, Dr. Israel Betancourt, por haberme permitido participar tanto tiempo en este proyecto, por haber depositado su confianza en mí. Gracias a todo el comité editorial por su colaboración y por supuesto, a todos ustedes, lectores, colaboradores y a todo aquel que esté tomándose el tiempo de leer estas líneas, muchas gracias. Estoy segura de que, con la participación de los nuevos miembros del comité, y con el apoyo y trabajo constante de Astron Martínez y Maricela Zapata, la revista tendrá una etapa luminosa. ¡Enhorabuena por este nuevo ciclo!

El número empieza con una semblanza de nuestro querido editor digital, Alberto López Vivas, cuya ausencia no deja de dolernos. En la biografía retratamos a un personaje que buscó equilibrar la balanza de la desigualdad social y racial, hablamos de Nichelle Nichols, figura emblemática usada por la NASA para atraer a las mal llamadas minorías a su programa de reclutamiento. ¡Tenemos que romper estereotipos!

En la sección de la reseña de libro presentamos un ensayo sobre la polémica legalización de la marihuana en México. Contamos en este número con una nota periodística sobre uno de los miembros de nuestra comunidad, nuestro querido y polifacético Miguel Ángel Canseco, se sorprenderán con las múltiples actividades que realiza y con todos los retos que ha enfrentado para poder diseñar pruebas para materiales. En la sección de artículos contamos con diferentes trabajos sobre materiales metálicos: un trabajo sobre el temple, esa técnica ancestral de tratamiento para metales que fue recuperada gracias al

estudio de los diagramas de fases. En otro, nos platican sobre el endurecimiento en aleaciones de aluminio. En otro más nos hablan sobre la biolixiviación de metales como estrategia de descontaminación. Contamos también con dos artículos relacionados con los cubrebocas desarrollados en nuestro instituto “SakCu”, uno de ellos nos explica cómo es que la capa de este nanomaterial puede inactivar virus, usando para ello el modelado molecular. En el otro nos platican acerca de las pruebas de seguridad y funcionalidad de la capa SakCu. El trabajo en el área de los materiales puede ser de tipo teórico y/o experimental, y en este número contamos con dos trabajos de corte puramente teórico, en uno nos platican cómo se estudia teóricamente la propagación de la luz en estructuras helicoidales y en el otro nos platican sobre simulaciones para estudiar materia condensada blanda. Contamos también con trabajos que nos hablan de biomateriales marinos; micomateriales (sí, aunque suene extraño, materiales basados en el reino fungi) y de dendrímeros como acarreadores de fármacos. También se presenta un trabajo en el que se discute un tipo de enlace químico muy interesante y poco convencional, se trata del enlace de halógeno.

En otro orden de ideas, presentamos un artículo que discute aspectos que correlacionan la educación, la desigualdad y la pandemia y otro sobre Thomas Harriot y Simon Stevin, matemáticos que revolucionaron el quehacer científico. Por último, presentamos los trabajos ganadores del Primer Congreso Estatal de Ciencia e Ingeniería de Materiales en tres modalidades. Para terminar nuestro número 36, en el arte presentamos el trabajo de Dafne Cruz Porchini y material de apoyo a la docencia haciendo uso de talleres de ciencia y arte.

¡Esperamos que lo disfruten!

## Editorial

La revista Materiales Avanzados es una publicación semestral con sede en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, Circuito exterior, sin número, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, México, Teléfono 56 22 45 00. CDMX [www.iim.unam.mx/revista](http://www.iim.unam.mx/revista), editora responsable: Estrella Ramos [eramos@iim.unam.mx](mailto:eramos@iim.unam.mx) Reserva de derechos al uso exclusivo del título ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Educación Pública 04-2003-041612533600-102. Certificado de licitud de título 12619, certificado de licitud de contenido 10191, expedidos por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. ISSN 1665-7071.

Correo electrónico [materialesavanzados@iim.unam.mx](mailto:materialesavanzados@iim.unam.mx)

# Índice

## 3 Presentación

**10** En memoria de Alberto López Vivas

**13** Biografía: Nichelle Nichols, una estrella de televisión en la NASA

*Luis Fernando Patlan Velázquez*

**17** Reseña: *La verde y sus verdades ¿a medias?*

*Luis Gatica*

**21** Noticias: Hasta la Luna, baterías de litio sobreusadas, sustentabilidad en el diseño y representatividad

**25** ¿Qué tanto hace Canseco con los plásticos?

*Astron Martínez*

## **29** Breve historia del temple: de las espadas a los automóviles modernos

*Helios Ocaña Ruiz, Gonzalo González Reyes  
y José María Cabrera Marrero*

## **33** Micomateriales: importados desde el reino de los hongos

*Eduardo Hernández Navarro*

## **39** Nanocapa SakCu®: ¿Por qué inactiva a los virus?

*Ana Martínez Vázquez, J. M. Bello López, P. Silva Bermudez,  
G. Prado, C. Ramos Vilchis, R. de la Torre,  
Gabriela Ibáñez Cervantes, Mónica Alethia Cureño Díaz,  
A. Almaguer Flores y S. E. Rodil*

## **43** Dendronización como estrategia para mejorar el desempeño terapéutico de sistemas moleculares

*Luis José López Méndez, Neyra C. Cabrera Quiñones,  
Julia Cassani Hernández y Patricia Guadarrama Acosta*

## **49** El enlace de halógeno

*Luis David Rosales Vázquez y Alejandro Dorazco González*

## **53** Endurecimiento en aleaciones de aluminio, ciclo de vida de precipitados

*Sarahi Cataño Torres, Carlos Gamaliel Garay Reyes y Roberto Martínez Sánchez*

## **57** La educación formal: entre la desigualdad educativa y la brecha digital en tiempos de post pandemia Ecuación difícil de resolver

*Jorge Alfredo Blanco Sánchez*

## **59** Estudio de un proceso de biolixiviación en un concentrado de hierro desde el punto de vista reológico

*Luis Medina Torres, Diola Marina Nuñez Ramirez, Luis Antonio Ramirez Torres, Fausto Calderas, Ma. Josefa Bernad Bernad y Octavio Manero*

## **67** Nanocapa SakCu®: pruebas de seguridad y funcionalidad

*C. Ramos Vilchis, E. Hernández, F. García López, D. Pérez y S. E. Rodil*

## **79** Thomas Harriot y Simon Stevin

*José Luis Álvarez García*

## **85** Propagación de luz en estructuras helicoidales

*Adrián Reyes y Laura Olivia Palomares*

## **99** Simulaciones por computadora en el estudio de la Materia Condensada Blanda

*Ana Beatriz Salazar Arriaga y Héctor Domínguez*

## **103** Biomateriales marinos

*I. A. Núñez Tapia, R. M. Jiménez Jiménez y M. C. Piña Barba*

## **I 14** Primer Congreso Estatal de Ciencia e Ingeniería de Materiales 2022

*Diego Arroyo Peralta.*

*Jathziri Avalos Grajales.*

*Priscila Ivette Román Román.*

*Andrés Galdámez Martínez.*

*Carlos Alberto Vital José.*

*Erick Ayala Sánchez.*

*Gerardo Gustavo Ramírez Ruiz, Estrella Ramos,*

*Héctor Domínguez y Rodolfo Gómez Balderas.*

*Dulce Guzmán, Mario Eduardo Cano, Jesús Bernal  
y Teodoro Córdova.*

*Jean Luis Castillo Sánchez, Arnulfo Montoya Moreno,  
Álvaro de Jesús Ochoa Calle y Óscar Olvera*

## **I 32** UNAM: Cien años del muralismo mexicano

*Dafne Cruz Porchini*

## **I 35** Material de apoyo a la docencia:

Talleres de arte y ciencia

*Astron Rigel Martínez Rosas*



# En memoria de Alberto López Vivas

Por: Astron Martínez

## Un archivo sin respaldo

Hace unos meses nos enfrentamos a la terrible pérdida de nuestro amigo, compañero, vecino y trabajador de la UNAM, Alberto López Vivas. En sus diez años de servicio a nuestro instituto seguramente tuvo la oportunidad de hablar con él en más de una ocasión, y aunque no lo haya hecho con regularidad, es bastante seguro que ya haya comenzado a percibir su ausencia. Esta revista lo sufrió desde el principio (pues *Albert* era uno de los pilares modulares de su correcto funcionamiento). Con el tiempo, los procesos y servicios de cómputo en nuestras instalaciones habrán de cambiar, adecuados a las nuevas personas operarias encargadas del departamento, pero el vacío de la noble y trabajadora persona que fue Alberto es definitivamente un hueco que nunca vamos a poder recuperar.



## Sistema operativo multitarea

Nació en la alcaldía Benito Juárez, en 1972. Hijo único. Desde que estudiaba en la secundaria le llamaron la atención las computadoras y tomó cursos escolares al respecto. Fue en este tiempo que junto con un compañero compró las partes necesarias para poder armar su primer equipo de cómputo, mismo que le serviría durante la educación media superior que hizo en Prepa 8. Albert era un hombre sensible, conocedor también de las bellas artes y amante del teatro musical. Incluso consideró hacer de la arquitectura su profesión y estudió algunos años de esta carrera en la UNAM antes de regresar a la computación. Entre sus intereses personales estaba la Fórmula 1 y los autos de carreras (que nunca se perdía la oportunidad de ver todos los fines de semana por televisión). Como tantos miembros de nuestra comunidad de Materiales, era fanático del *Señor de los anillos*, *La guerra de las galaxias* y el cine de ciencia ficción. Usted seguramente tuvo la oportunidad de hablar con él de alguno de estos temas, como yo tuve la oportunidad de discutir de teatro y de otros proyectos mientras salíamos a comer o durante las reuniones de trabajo. A Albert también le gustaban las películas de acción y escuchar el rock progresivo de Rush, tanto como Phil Collins y Metallica. Se dio tiempo para concluir una maestría en migración de sistemas, en la Universidad Tecnológica de México y estaba realizando un segundo posgrado para especializarse en administración de infraestructura de cómputo de alto rendimiento, antes de que un fatídico evento vascular cerebral interrumpiera sus planes.



## Eficiente, eficaz y humano

Fue Técnico Académico Titular A de tiempo completo y el responsable de cómputo en el instituto desde 2020. Entró a trabajar en 2012, como asistente de procesos; en 2017 obtuvo la plaza como técnico asociado, y antes de esto trabajó en DGTIC (de ahí la estrecha relación que nuestro instituto siempre guardó con esta Dirección general de cómputo). Su servicio social (de la carrera de ingeniería en sistemas computacionales) lo hizo en esta misma Dirección. “Trabajaba hasta tarde, así que casi siempre comía fuera de la casa”, recuerda su familia, quienes igual lo describen como introvertido, callado y “más que nada sociable en el ámbito laboral”. La rapidez con la que editaba digitalmente contenidos era destacable (eso y todas las dudas cotidianas y profesionales relacionadas con tecnología y computación que llegábamos a hacerle, incluso a deshoras, él las contestaba rapidísimo). Albert también era muy generoso, donó íntegramente su primer cheque a un instituto de niños sin hogar y apoyaba económicamente a su familia. En muchas ocasiones se rehusó a recibir pago tras reparar y equipar las computadoras de algunos de sus seres queridos e incluso de jóvenes talento a quienes no conocía.



## ¿Desea guardar los cambios antes de cerrar?

Las ciencias naturales y exactas pueden ser bastante alienantes y mantenernos ocupados dentro de nuestros libros, anotaciones, algún experimento o el silencio de nuestros cubículos. Aprendamos que aquella plática que quedó a la mitad, esa fotografía con nuestros colegas que jamás tomamos o esas fechas pospuestas de reunión, podrían no llegar nunca. No es fácil hablar de estos temas ni recordar a un amigo y a un colega como Albert, quien fuera tan importante para el Instituto de Investigaciones de Materiales de la UNAM. Un profesionista joven nos mostró el valor de su trabajo en más de una ocasión y a la fecha podemos recordarlo en ponencias y pláticas donde expuso algún tema (y que quedaron grabadas en internet) o en su inconfundible firma en casi todas las publicaciones digitales realizadas antes de 2022.

Ya fuera resolviendo nuestras dificultades tecnológicas o haciendo más accesible y fácil nuestra labor institucional, no teníamos forma de anticipar que Alberto nos estaba regalando los mejores años de su vida. Sus padres, Rebeca Antonia Vivas y Alberto López Sánchez; sus primos, Israel Velázquez y Arturo Orcillez; su amiga de la carrera, la diseñadora industrial Brenda; todo el equipo que conformamos esta revista, y toda aquella persona lectora que en este momento decida sumarse recordando a Alberto, hágalo. En nuestra memoria, Alberto López Vivas (1972-2022). Tu labor sigue vigente.



**Enlaces:** <https://www.youtube.com/watch?v=3RbX75oQL0w>  
<https://mx.linkedin.com/in/alberto-l%C3%B3pez-vivas-882056ab>  
<http://www.paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/index.php/academicos/datosContacto/alias:albertolopez>  
[https://www.researchgate.net/profile/Alberto\\_Lopez-Vivas](https://www.researchgate.net/profile/Alberto_Lopez-Vivas)



# Biografía:

## Nichelle Nichols: una estrella de televisión en la NASA

Luis Fernando Patlan Velázquez

Departamento de Biotecnología, Universidad  
Autónoma Metropolitana-Iztapalapa,  
Av. San Rafael Atlixco 186, Col. Vicentina,  
C.P. 09340, CDMX, México

[colectivodivu@gmail.com](mailto:colectivodivu@gmail.com)



Entre 1966 y 1977, el investigador David Chambers les pidió a 4807 estudiantes de primaria que dibujaran *una persona de ciencias*, para conocer su percepción del tema. Años después, en el 83, Chambers estandarizó sus resultados y publicó formalmente la “Prueba para dibujar personas de ciencias” (*Draw-a-Scientist Test*). Algo que resaltó es que, en ese primer ensayo, solo 0.6 % de los dibujos retrataban a mujeres científicas, mientras que el resto eran hombres. Con el paso de los años este porcentaje ha aumentado y en 2018, a casi cincuenta años de la prueba, este llegó al 28 % ¿Qué fue lo que cambió?, la **representación**.

En el mismo año que Chambers iniciaba sus experimentos, una nueva serie televisiva llegaba a la pantalla chica (ahora, a todo color) misma que revolucionaría la forma en la que se representaba la ciencia ficción en los medios visuales: *Star Trek* (o *Viaje a las Estrellas*, en su versión en español). Entre muchas otras cosas, algo que destacó de inmediato fue la diversidad de personajes que integraban el elenco. Esto fue contemplado desde un inicio por su creador, Gene Roddenberry, porque “en el siglo XXIII esta va a ser la norma, no la excepción”, (influenciado sin duda por las revoluciones sociales de su época: los derechos civiles, feminismo, liberación LGBT+).

Dentro de este robusto conjunto de personajes existió una fémica que de inmediato acaparó toda la atención y los reflectores. Se trataba de la teniente Uhura, que era interpretada por Nichelle Nichols.



Nunca antes una mujer afroamericana había aparecido en las pantallas interpretando a un personaje de poder, es más, de *poder galáctico* (y mucho menos en el ámbito de la ciencia ficción). Los personajes racializados que no recayeran en papeles estereotípicos (sirvientes, personal de apoyo, trabajadoras sexuales) dentro del cine y la televisión eran escasos, y esto es algo que sin duda el público notó.

Pero se dice que Nichols, una talentosa joven actriz proveniente de Chicago, solo consideraba este show como un trabajo de paso mientras llegaba a Broadway (el sueño actoral de esos tiempos). Incluso estaba decidida a dejar Star Trek después de su primera temporada cuando, en una convención, un fanático pidió charlar con ella. Para su sorpresa se trataba del mismísimo Dr. Martin Luther King Jr. (hijo del importante activista y defensor de derechos humanos), quien le pidió quedarse en el programa.

Le explicó que la importante representación que ella aportaba era tan significativa como las marchas sociales que su padre había dirigido a inicios del movimiento antirracista. Con tan poderosas palabras, ella cambió de parecer y se mantuvo en el programa televisivo hasta su eventual cancelación, en 1969. Pero que el programa terminara no quiso decir que su contribución a las causas sociales tuviera el mismo destino. La enorme popularidad de esta franquicia (que continua hasta nuestros días) la llevó a participar en convenciones anuales durante la agitada década de 1970. Es allí donde comenzó a coincidir con figuras claves de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), quienes de inmediato notaron el impacto de Nichelle con el público, particularmente con las mal llamadas *minorías* (mujeres y personas de color).



Fue también a finales de los 70s y principios de los 80s que los reclutadores espaciales notaron la falta de interés por las convocatorias de sus programas. Necesitaban tener reclutas más diversos, con perfiles diferentes y que pudieran aportar nuevas formas de resolver problemas.



Es así que, como parte de la carrera espacial, la NASA intensificó sus programas de reclutamiento haciendo un mayor énfasis en la diversidad de perfiles y, notando que Nichelle seguía siendo reconocida como un referente de mujeres en las ciencias, se le invitó a participar dentro del programa para atraer a más mujeres y personas afrodescendientes a las filas de su agencia.

NASA  
C-1977-1578



National Aeronautics and Space Administration  
Lewis Research Center

Con apenas un entendimiento preuniversitario de física, matemáticas y ciencias naturales, Nichelle se dio a la tarea de conocer a profundidad el trabajo que se hacía en la que fuera la agencia espacial más importante a nivel global, asesorándose de las brillantes mentes que fueron sus compañeros de trabajo y preguntando todo aquello que no entendía. Ella es un ejemplo de que todas las personas interesadas por aprender (incluso las célebres y ocupadas estrellas de televisión) pueden informarse de la ciencia y la tecnología que hacemos en los institutos de investigación. También es muestra de que no es necesario ser un científico o una científica para ser partícipe de la ciencia y para aportar, con nuestras habilidades y talentos, al progreso tecnológico y social.

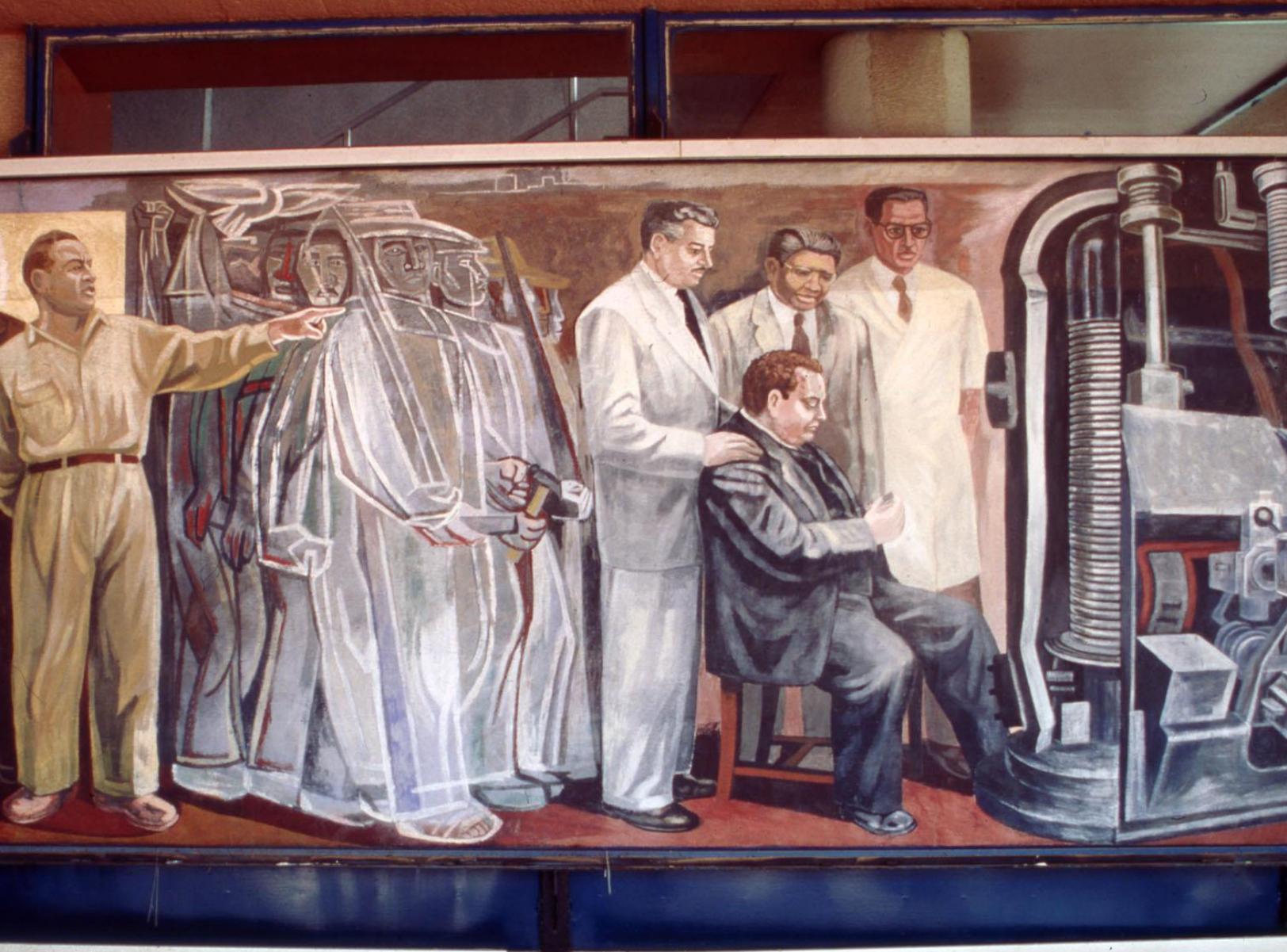
Dentro de los múltiples ejemplos de personas que se integraron al programa espacial gracias a Nichelle podemos destacar a Guion Bluford, quien fuera el primer hombre afroamericano en ir al espacio, y Sally Ride, la primera mujer astronauta. Sally Ride tuvo que mantener su orientación sexual (como mujer lesbiana) en secreto, debido a las políticas conservadoras de la NASA hasta el día de su muerte.

Las colaboraciones de Nichelle Nichols con la NASA continuaron a lo largo de toda su vida. Durante sus talleres, conferencias y pláticas ella siempre recalca la importancia de que toda la humanidad, no solo unos cuantos privilegiados, pudiera ser partícipes de la fascinante exploración del espacio y de la ciencia y la tecnología que nos permitieron alcanzarlo.



Nichelle Nichols murió recientemente, el 30 de julio del 2022, a sus 89 años de edad. No obstante, su legado sigue y seguirá viviendo en cada una de las infancias que deciden dibujar mujeres científicas y personas de color ocupadas en ciencia y tecnología, cuando se les pida que ilustren: “¿en qué piensan cuando escuchan hablar de personas dedicadas a la ciencia?”.







## Reseña:

# *La verde y sus verdades ¿a medias?*

Luis Gatica

[luisgatica@iteso.mx](mailto:luisgatica@iteso.mx)

La Revista de la Universidad de México editó un número especial sobre las drogas y su legalización en 2020. El suplemento de divulgación científica perteneciente a la colección *¿Cómo ves?* tiene un texto desafortunadamente moralista al respecto. Es así que fui invitado a escribir la siguiente reseña, con motivo de los cambios por venir en la legislación mexicana vigente.

*La verde y sus verdades* es un libro muy sencillo de leer que trata sobre la marihuana. Fue escrito por el doctor en derecho Adalid Melgar e ilustrado por Jorge F. Muñoz. Está compuesto por una nota aclaratoria, un texto inicial, un cómic y un texto final con varios apartados. La nota aborda cómo es que se encumbra o se demoniza a la marihuana, y cómo eso dificulta la divulgación de “posiciones objetivas, sustentadas en evidencias científicas, médicas, legales y sociales”. En ese sentido el libro hace valiosos aportes, pero también deja suficiente que desear (más allá de que cinco años después, el panorama legal para la marihuana en México ha tomado ciertos giros con la entrada del actual titular del ejecutivo federal).

El primer texto aborda la prohibición de la cosecha, preparación, acondicionamiento, comercio, transporte, suministro, empleo y uso de la marihuana en nuestro país.

Apunta que, a partir de una reforma legal realizada en junio de 2017 se permiten su siembra, cultivo o cosecha para fines médicos y científicos bajo algunos términos muy específicos autorizados por la Secretaría de Salud. Dichas reformas se debieron al caso de la niña Grace Elizalde, en la ciudad de Monterrey. Los padres de Grace lucharon judicialmente, y ante la Secretaría de Salud, para poder importar un medicamento (hecho a base de marihuana) que mitigara sus convulsiones epilépticas. La autorización que consiguieron favoreció que otras personas también pudieran obtener medicamentos que necesitaban y estaban basados en marihuana.

De acuerdo con el texto, científicos de todo el mundo consideran que la marihuana medicinal puede ser bastante útil en el tratamiento de algunos malestares específicos asociados a padecimientos como el cáncer, diabetes mellitus, glaucoma, epilepsia, esclerosis lateral amiotrófica, síndrome de Alzheimer, ansiedad-depresión, trastornos del sueño, asma bronquial y la isquemia cerebral. Por otro lado, para el 2017, de acuerdo con el autor, Uruguay, Portugal y Colombia habían avanzado en la regulación del uso de la marihuana. En siete estados de EEUU (incluido California, que colinda con México) el consumo de marihuana ya se había legalizado, tanto para uso medicinal como recreativo. Otros 29 estados igual habían logrado importantes avances en materia de regulación.

Regresando al texto, en la sección del cómic hallamos a un muchacho llamado Pepe, quien prueba la marihuana con dos amigos suyos (de los cuales, al menos, uno la utiliza recurrentemente). Entre los efectos reportados en el libro se incluyen: audición levemente distorsionada; visión que percibe colores más vivos y luz más brillante; un ligero aumento del ritmo cardíaco; pérdida leve del tacto, y aumento del apetito. Ante la tentativa de salir a la calle, los amigos comentan que en nuestro país es legal portar hasta cinco gramos (“como tres churros, más o menos”), pero que está discutiéndose un cambio de tal límite a 28 gramos. Cuando Pepe propone beber unas cervezas, sus amigos responden que “se cruza” y que “nunca se mezclan las dos”, sin dar ningún detalle o explicación posterior. Varias páginas después, Pepe está en una habitación con otra joven. Le cuenta que ese día se estrenó con la marihuana unas tres horas antes. Cuenta que esperaba algo más fuerte y que “se siente padre”. La chica le señala que tiene los ojos muy rojos y él agrega que siente la boca seca “como estropajo”. Ella expresa que cree que “es algo malo” y le dice que no lo vuelva a hacer. Él responde “ok” y le informa que necesita descansar. Por los dibujos, podríamos pensar que se ha quedado dormido.

La chica acude con su padre, quien casualmente es un médico, y le cuenta que Pepe consumió. Su padre le dice que no se preocupe porque, si bien se trata de una sustancia adictiva, esta es mucho menos adictiva que el cigarro y el alcohol. Ella le pregunta si le importaría que ella la probara, a lo cual él le pregunta si Pepe va con ella, indicándole que pase. La chica deja pasar a Pepe, pero señala que él no contestó su pregunta. Tristemente, en el resto del cómic tampoco obtendrá su respuesta a una pregunta tan importante y a la cual muchos lectores habrán de afrontarse alguna vez. Al pasar Pepe, el médico le dice inmediatamente que *tenga cuidado con la yerba*. Pepe pregunta si es peligrosa; la respuesta es que “es una droga, así que cuidado”. Pepe insiste: “¿Es peligrosa como el cemento que usan los chavos de la calle?” Una vez más, no hay respuesta, pues el médico contesta que “es adictiva y peligrosa para los menores”. Luego agregará que el consumo (para cualquier persona) propicia apatía, falta de interés y desatención, además de afectar la memoria y producir distorsión de la realidad.

Acto seguido, el médico habla del campo “casi desconocido” de la marihuana medicinal, donde no obstante “se ha avanzado mucho”. Cuenta que está comprobado que la marihuana sirve para mitigar dolores en personas con enfermedades crónicas. Después, reitera que es muy peligroso para niños y menores de edad fumar, pero esta vez sí explica que se debe a que no

han concluido su desarrollo cerebral y que pueden sufrir consecuencias, en especial antes de los quince años. “Eso incrementa el riesgo de crecer con síntomas psicóticos o con trastornos esquizofreniformes”.

Cuando la chica pregunta a su padre si él ha fumado, este levanta una mano y responde que en su época había muchos prejuicios contra la marihuana. De nuevo la pregunta queda sin una respuesta satisfactoria. ¿Ni siquiera un médico informado puede ser un padre que encare el estigma de las drogas y hable claramente con su hija? ¿Dónde quedan los datos duros, las investigaciones científicas recientes, las décadas de seguimiento a casos que desestigmatizan el consumo recreativo? Dramáticamente, en lugar de responderle, habla de que muchos famosos fuman o han fumado marihuana y pone algunos ejemplos...

Después de esa conversación, Pepe y su amigo que consume regularmente van a comer tacos y se encuentran por sorpresa con el *licenciado* Pereda. Le dicen que quieren preguntarle sobre la cannabis “para un trabajo de la escuela”. Él corrige: para la escuela y “para ellos” también, y les pregunta directamente si “ya se las truenan”. Uno responde afirmativamente al comentar que la Suprema Corte ya la legalizó, dato que Pereda califica de impreciso. De acuerdo con él, más bien, la Suprema Corte ha reconocido el derecho a la identidad personal y al libre desarrollo de la personalidad.

Pereda vuelve a preguntarles si han fumado y los dos amigos contestan afirmativamente. Cuando el amigo de Pepe devuelve la pregunta a Pereda, este responde que cuando era joven estaba de moda hacerlo para oír a los Rolling o a los Beatles, “pero no se sabía nada como ahora”. Si bien podemos interpretar esto de manera afirmativa, esto es bajo el riesgo de partir de una respuesta muy vaga.

En discusión, Pereda no está seguro al respecto de la legalización del consumo porque “al final [la marihuana] es una droga”. Sin embargo, defiende que no se debería encarcelar a los usuarios. Señala que “las cárceles están llenas de supuestos delincuentes que portaban [no mucho] más de cinco gramos” y habla de un movimiento para modificar las leyes que tendría como consecuencia liberar a miles de las prisiones. Ante la pregunta de si se puede fumar sin cometer un delito, Peredo contesta que la autorización solo se aplica para quienes solicitaron un amparo: “cuatro personas que pueden producir y consumir, pero nunca vender”. El cómic termina con uno de varios tipos de clasificación de consumidores de marihuana, según la dosis y su frecuencia de consumo.

El segundo texto comienza con un apartado sobre la marihuana en el mundo. Este aborda, por ejemplo, el caso de Holanda y sus *coffee shops*, que son lugares con licencia intransferible en donde la compra de marihuana es legal. El texto alerta sobre la facilidad de pensar injustificadamente que “en Holanda existe una política de liberación y permisividad absoluta sobre drogas”, y comenta algunos puntos sobre leyes holandesas al respecto. Por ejemplo, que la posesión de marihuana está penada o que no está permitido fumar marihuana en público, aunque sí puede hacerse en los *coffee shops* de Ámsterdam.

El apartado siguiente, ilustrado con un dibujo del licenciado Pereda, trata sobre la “guerra contra la marihuana”. Ahí, el reconocido jurista Melgar, autor del libro, afirma que la “prohibición de la marihuana ha producido un resultado diferente al que la motivó. La justificación de la política prohibicionista era alcanzar la seguridad y la salud de la población, así como la protección de la juventud”. Acto seguido comenta que la criminalización de las drogas y las estrategias para “prohibir su suministro” han tenido como resultado el incremento de los precios de esas sustancias, sin una reducción significativa en la producción o el consumo. Finalmente, agrega que la criminalización ha traído violencia y corrupción. El doctor Melgar alega que el fracaso de la “guerra contra las drogas” ha tenido como consecuencia que un número creciente de países opte por una estrategia diferente, ahora “bajo la luz de la salud pública”, especialmente en el caso de la marihuana. Mientras tanto, en México “los daños colaterales [...] han sido graves. Entre otros, un aumento a la corrupción, jóvenes en las cárceles por faltas menores, violación de derechos humanos, el fortalecimiento y proliferación de carteles de drogas y la amenaza que representan para la seguridad de los ciudadanos.” El libro termina con un apartado sobre la aprobación de la marihuana medicinal en México, después de interpretarla como “un paso importante para abandonar la política prohibicionista”.

A pesar de las pretensiones que pone sobre la mesa la nota aclaratoria, en momentos el libro parece tener el objetivo de responder de manera simplona las preguntas de su contraportada. Parece comprometerse más con sus ganchos mercadotécnicos que con la completud de la información “neutral, imparcial, sin prejuicios” que supuestamente desea abonar. Falla, por ejemplo, en algo tan fundamental como proveer una definición de droga. Se infiere fácilmente que las drogas son algo que exige un acercamiento cuidadoso, pero no se establece por qué ni qué tienen de distintivas aquellas sustancias llamadas drogas con respecto a las demás.

Finalmente, aunque el texto articula una problematización del prohibicionismo, nunca da espacio a la discusión sobre la posibilidad de que el propio prohibicionismo (en México y otros países de América Latina) no obedezca ya a las pretensiones de seguridad y salud, sino a lógicas donde el crimen organizado se vea beneficiado, que apenas si señala el propio Melgar en el texto final. A pesar de que se trata un texto de divulgación con un nivel elemental, el libro falla en su función de facilitar a sus lectores el acceso a más información sobre el tema. Por ejemplo, en algún momento menciona que “la edad promedio del primer consumo de drogas en México es de 14 años y usualmente es marihuana”, pero ni comenta más al respecto ni incluye en todo el libro una referencia bibliográfica para consultar más. Tampoco lo hace para el resto de la información que presenta. Así, el formato del cómic acompañado de textos pierde mucho de su potencial. ¿Será que, ante la nueva legislación, Melgar y Muñoz nos sorprenderán con una edición corregida y aumentada?



**Melgar, Adalid y Muñoz, Jorge F. (2017)**  
**La verde y sus verdades. Ciudad de México: Selector**  
**ISBN: 978-607-453-523-5**



# Noticias:

Hasta la Luna,  
baterías de litio  
sobreasadas,  
sustentabilidad en  
el diseño y  
representatividad



## La primera misión de México a la Luna con el Proyecto Colmena

Por: Maricela Zapata Arroyo

Puesta en marcha del Proyecto COLMENA: Arrancó la primera misión de México a la Luna con el Proyecto Colmena, con la creación de microrobots que abren la posibilidad de montar estructuras en el satélite natural.

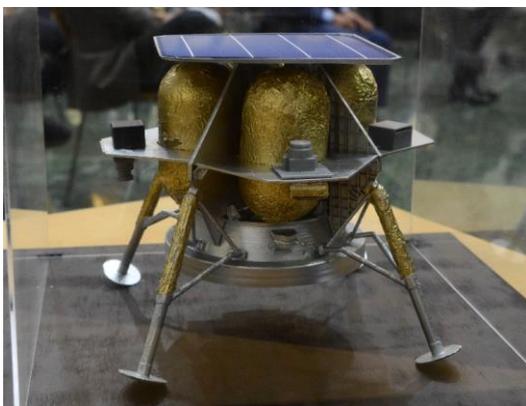
El proyecto es liderado por el científico Gustavo Medina Tanco, doctor en Física y creador del Laboratorio de Instrumentación Espacial (LINX) del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM y también colaboran la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE), el estado de Hidalgo y la Agencia Espacial Mexicana (AEM).



La misión que despegará en el segundo semestre de este 2022, está conformada por cinco pequeños robots de menos de 60 gramos y 12 centímetros de diámetro cada uno, que serán colocados en la superficie lunar, los cuales ya están instalados en la nave Peregrine, de la empresa Astrobotic.

Una vez que aterricen en la Luna, cuentan con instrumentos para tomar muestras del regolito o polvo lunar para saber si esta puede funcionar como un recurso para la producción de oxígeno y metales. Por otro lado, los microrobots abrirán la posibilidad de montar estructuras en la superficie lunar gracias a la medición de la dinámica del regolito, como la temperatura y la sedimentación, así como la coordinación automática de los robots para poder ensamblar un panel solar generador de energía eléctrica.

*La misión de este proyecto define una de las prioridades del futuro y las instituciones participantes entienden el momento único que se vive en el sector espacial mundial, del cual México es parte*



Durante la presentación de la misión, el rector Enrique Graue Wiechers expresó que esta es una ceremonia de celebración pues muestra la fortaleza de la Universidad Nacional y de sus institutos de investigación, así como de los avances obtenidos por el Laboratorio de Instrumentación Espacial (LINX), con la participación de estudiantes de varias especialidades, quienes aplican la ciencia básica para transformar la realidad.



El responsable del LINX, del Instituto de Ciencias Nucleares (ICN) de la UNAM, Gustavo Medina Tanco, expuso que se vive una gran transformación de lo que se conoce como Espacio 4.0 y que COLMENA se inscribe en ella como una misión internacionalmente original.

Por su parte, el director de la Agencia Espacial Mexicana (AEM), Salvador Landeros Ayala, destacó que con el proyecto COLMENA se refrenda que la ingeniería mexicana está al nivel de las mejores del mundo, ya que será el primer proyecto mexicano sobre la exploración lunar.

### Referencias

- [https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2022\\_087.html](https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2022_087.html)
- <https://www.uaeh.edu.mx/divulgacion-ciencia/noticias/proyecto-colmena/>
- <https://www.adn40.mx/ciencia/luna-inteligencia-artificial-unam-mexico-dps>

## Tomografiar baterías ayuda a entender por qué estas dejan de funcionar

Por: Karina Suárez Alcántara

Hoy en día, la tecnología está fuertemente ligada a uso de baterías, en particular las de Ion-Li. Desde relojes inteligentes, celulares, laptops hasta automóviles eléctricos, las baterías de ion-Li (aka Li) dominan el almacenamiento de energía en aplicaciones portátiles y/o móviles. Sin embargo, el uso de las baterías de litio supone muchos retos. Uno de ellos es comprender los mecanismos por los cuales se degradan y dejan de funcionar. Así que investigadores de Canadá pusieron manos a la obra y, durante uno y hasta dos años enteros, estuvieron continuamente cargando y descargando baterías de litio, que posteriormente fueron tomografiadas por medio de rayos-X en el sincrotrón canadiense "Canadian Light Source".

En términos de la versatilidad de usos de las fuentes de sincrotrón, el trabajo reportado permitió el estudio de baterías sin la necesidad de desensamblarlas, además de incluir otros factores de estudio y error. Con esto se obtuvieron impresionantes imágenes tridimensionales de las baterías estudiadas. En términos de materiales, los componentes de las baterías de ion litio están sujetos a muchos factores que contribuyen a su (rápida) degradación. Estos factores incluyen la inserción y desinserción del ion Li en los materiales de electrodo, el ambiente electroquímico, degradación química, estrés térmico y mecánico que pueden formar grietas, etc.

En particular, los investigadores canadienses liderados por T. Bond y J.R. Dahn determinaron que la formación de grietas en los materiales es de fundamental importancia, ya que conlleva el drenado de la solución electrolítica de las baterías. Como todo dispositivo electroquímico, al encontrarse sin el electrolito, la celda electroquímica falla. Esto tiene como consecuencia la necesidad de reemplazar la batería, implicando costos adicionales y generación de residuos (actualmente, la mayoría de las baterías desechadas no se reciclan y son fuente de contaminación ambiental). Por tanto, esta investigación es de suma importancia, pues nos puede ayudar a mejorar los dispositivos electrónicos que tanto utilizamos en nuestra vida diaria.

### Referencias

- <https://www.lightsource.ca/public/news/2022-23-q1-apr-june-x-rays-capture-ageing-process-in-ev-batteries.php>
- Bond, Toby, Roby Gauthier, Ahmed Eldesoky, Jessie Harlow, and Jeff R. Dahn. "In Situ Imaging of Electrode Thickness Growth and Electrolyte Depletion in Single-Crystal vs. Polycrystalline LiNixMnyCozO2/Graphite Pouch Cells using Multi-Scale Computed Tomography." *Journal of The Electrochemical Society* (2022). <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac4b83>

## Sustentabilidad: una nueva concepción en el Diseño Industrial

Por: José Antonio Cera Ramos

La sustentabilidad es un tema que ha causado diferentes puntos de vista en todo el mundo. Los estragos ocasionados por el consumismo desmedido del ser humano son evidentes y, de acuerdo a la ONU, la humanidad ha generado el 75 % de alteraciones de la superficie terrestre. Nos queda entonces apenas un pequeño rincón de naturaleza. Las consecuencias son graves y preocupantes, por lo cual muchos países se han visto en la necesidad de actuar ante esta situación.

Lo anterior puede verse como una consecuencia del desarrollo que ha tenido la sociedad moderna al facilitar nuestras tareas cotidianas a través de productos, y es aquí donde los diseñadores industriales cobran un papel importante (aunque no se trate de la solución definitiva a los problemas medioambientales). Lo que sí podemos generar son cambios en el mercado, proponiendo productos y servicios que no solo beneficien al medio ambiente, sino que también sean económicamente inclusivos y socialmente justos.

Dicho esto, debemos de tener en claro que, si bien existen materiales que pueden tener una menor huella de carbono, también existen alternativas en los procesos de fabricación, porque se debe considerar el ciclo de vida de un producto desde su concepción hasta el fin de su vida útil. Es aquí donde la formación escolar de los nuevos diseñadores cobra importancia. Varias universidades han realizado esfuerzos por impartir materias, de manera colaborativa, en torno al “Diseño Sustentable”, con el objetivo de tomar conciencia y eliminar las malas prácticas que se han tenido durante muchos años (como el desperdicio de materiales, la obsolescencia programada y el uso de productos químicos generadores de emisiones contaminantes, por mencionar algunos).

En la práctica disciplinar, despachos de diseño y arquitectura han realizado acciones proponiendo productos que hacen uso de tecnologías actuales, como el CNC (Control numérico por computadora). Esto ha hecho que sea posible fabricar objetos sin la necesidad de la producción masiva y con un mejor aprovechamiento de materiales. Algunos ejemplos destacables son las impresoras 3D y los routers CNC (que también permiten la utilización de materiales reciclables y la recuperación de desperdicios). A través de estos medios de producción, y de otros tantos más como el *patchworking* y la colaboración con artesanos, se han obtenido resultados que abarcan desde muebles hechos de materiales reciclados, hasta la confección de prendas, calzado, accesorios, utensilios para

el hogar, juguetes, etc. Los productos son duraderos y ayudan a tomar conciencia de la importancia de la economía circular.

También existe el concepto de la “desmaterialización” de los productos, que a primera instancia pudiera escucharse como una idea radical. A lo que este concepto se refiere es a la utilización óptima de los materiales, es decir, deshacerse de todo aquello elemento que no se necesite para que el producto pueda cumplir su función. Propone una estética atemporal y simple, con la finalidad de tener un equilibrio en lo que se conoce como el “trínomio del Diseño”: usuario, contexto y objeto. También hay casos en donde los objetos pueden ser sustituidos por servicios como, por ejemplo, las plataformas de *Streaming*, que disminuyen el consumo de los formatos físicos.

Lo cierto es que no podemos prescindir de los objetos que utilizamos cotidianamente, pero sí podemos cuestionarnos sobre el impacto que generamos a nuestro planeta e informarnos para realizar acciones que cambien nuestros hábitos de consumo.



Ejemplo de muebles elaborados con material reciclado, hecho por el despacho ecoBirdy. Judy Side Table Faded.



Trabajo hecho con *Patchworking* por el estudio Thompson Street Studio. Collection Four.

### Referencias

- Acosta Fuentes, I., Dupont Caballero de Carranza, M., García Parra, B., & Luz Molina Mata, S. (2012). *Sustentabilidad y diseño industrial*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Angulo, M. R. (s.f.). *MDI Rubén Sahagún Angulo*. Obtenido de <https://sahagun.webnode.mx/>
- Borges, A. (2014). *Diseño sustentable: más con menos*. Ciudad de México: Centro de Diseño y Comunicación S.C.
- ecoBirdy. (s.f.). *ecoBirdy*. Obtenido de <https://www.ecobirdy.com/>
- Thompson Street Studio. (s.f.). Obtenido de <https://www.thompsonstreetstudio.com/>

## Representatividad

Por: Alfredo Manríquez Rangel

Las misiones Artemis representan el regreso de NASA y el gobierno de los Estados Unidos a la carrera espacial dentro de un entorno muy competitivo a nivel internacional. El que será el paradigma de exploración durante las próximas décadas se está librando entre las agencias espaciales rusas, chinas y una colaboración entre la Agencia Espacial Europea, NASA y el sector privado. De todos los contrincantes, Artemis es el más ambicioso, pues busca poner nuevamente astronautas en la Luna con miras de sentar una base permanente en el satélite natural de la Tierra. Nos encontramos en un entorno político internacional muy delicado, se espera que Rusia utilice sus recursos para poner en órbita a su propia estación espacial permanente (sumándose entonces a la Estación Espacial Internacional y a la estación china Tiangong).

Con estos esfuerzos queremos algún día poder llegar a Marte, ser capaces de explotar recursos minerales de los asteroides del sistema solar y desarrollar tecnología de punta aquí en la Tierra. Es muy importante mencionar que NASA ha repetido en múltiples ocasiones que la misión Artemis llevará no solo a la primera mujer, sino también a la primera persona afrodescendiente a la Luna. La relevancia de esto último se entiende dentro del contexto social que busca generar inclusión y mostrar personas que representen la diversidad de aquellas personas que estamos interesadas por el desarrollo de la ciencia y la tecnología.

La Organización de las Naciones Unidas (ONU), a través de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés), indica que las mujeres representan apenas un 35 % de la matrícula educativa superior en áreas de ciencia y tecnología. Por cada cien mujeres que estudian una carrera en áreas científicas y tecnológicas, solo una de ellas lo hace en carreras de cómputo, información o telecomunicaciones [1]. Los porcentajes de quienes desean continuar su formación académica caen dramáticamente después del tercer año de estudios en programas de doctorado, siendo las mujeres las más afectadas. Las brechas de género suelen ser explicadas debido a la poca seguridad laboral, la necesidad de cambiar constantemente de residencia y la falta de tiempo para desarrollarse como madres. Aunque estas problemáticas también las enfrentan varones, los roles de género tradicionales hacen que estas actividades recaigan sobre las mujeres y perjudiquen notablemente su desarrollo profesional dentro de la academia.

El problema de la poca representación de las mujeres y otras minorías en áreas de ciencia y tecnología debe ser atendido de forma interdisciplinaria. La representación de las mujeres y de la población LGBTQ+ en áreas científicas es importantísima, pero también lo es cambiar la manera en la que se vive al interior de las áreas de trabajo científico y, sobre todo, la forma en la que el público entiende nuestra labor científica

y tecnológica. Desde hace más de 40 años se ha identificado que mujeres y población LGBTQ+ son particularmente vulnerables a consumir material pseudocientífico, particularmente contenido astrológico [2]. En la era de la información esto es particularmente problemático, pues los algoritmos que determinan el contenido que veremos en las plataformas sociales aíslan y generan efectos de *cámara de eco*, una vez que identifican dicho patrón de consumo. Si dentro de la academia nos enfocamos únicamente a dirigir nuestra atención y esfuerzos de comunicación a quienes ya están consumiendo contenido científico y tecnológico (desatendiendo a las poblaciones vulneradas) las pseudociencias no harán más que continuar agravando la brecha de género existente.

Existen algunos estudios al respecto, y muestran que la razón principal por la que algunas personas consumen materiales astrológicos o pseudocientíficos es por el sentimiento de bienestar y felicidad que les ofrecen las pseudociencias [2]. Por eso propongo que, para lograr una verdadera representatividad, no basta con poner a personas *que reflejen la diversidad* de nuestras comunidades, también tenemos que enseñar cómo es que la ciencia nos brinda bienestar, felicidad y progreso a nivel individual, cuando la aplicamos de forma cotidiana fuera de los ambientes académicos.

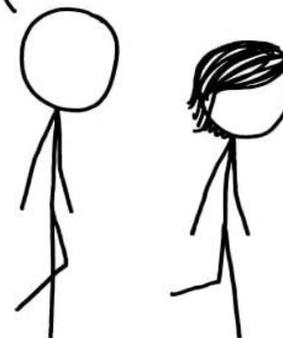
### Referencias

- [1] <https://es.unesco.org/themes/educacion-igualdad-genero/stem> consultada el 29 de agosto 2022
- [2] <https://doi.org/10.31234/osf.io/xn7wd>

Si ya pusimos un hombre  
en la Luna...

... un hombre?

... disculpa, lo estamos  
intentando



# ¿Qué tanto hace Canseco con los plásticos?

Astron Martínez

DiVU a.c.

[astronr@hotmail.com](mailto:astronr@hotmail.com)

Todos llevamos un poco del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM cerca de nosotros... Hurgue ahora mismo en sus bolsillos, bolsa de mano o cartera para encontrar la credencial de elector que nos identifica a los ciudadanos mexicanos (INE) o en su defecto su licencia para conducir y entenderá lo que le digo. Y es que durante casi dos décadas el Estado mexicano ha depositado su confianza en las manos de un investigador que trabaja en nuestro instituto IIM, pues él es el encargado de realizar las más rigurosas pruebas de seguridad y permanencia en el tiempo de estos trascendentes trozos de plástico que se han vuelto indispensables en nuestra vida diaria.



Es entonces que, cuatro veces al año, nuestro maestro, vecino y amigo Miguel Ángel Canseco Martínez recibe en su laboratorio un centenar de credenciales de elector. Ahí todo se les mide: ¿resistirán la inmersión total en gasolina o en anticongelante?, ¿qué hay del agua de mar, sudor humano, bebidas azucaradas o bebidas alcohólicas? Las diferentes mezclas de hidrocarburos, etilenglicol, cloruro de sodio, ácido acético y tantos otros reactivos químicos tienen la finalidad de imitar artificialmente las complejas matrices, acuosas y no acuosas, que podrían entrar en contacto con las desafortunadas identificaciones INE seleccionadas para ser sometidas a las más diversas pruebas y ensayos.



## 350 nanómetros

El equipo estrella en el laboratorio de Canseco es la “cámara de intemperismo acelerado” que sirve para simular el proceso de envejecimiento. Imitando ciclos térmicos, de humedad relativa y fotoperiodos controlados pueden simularse condiciones extremas. Un año entero de exposición a las condiciones ambientales puede entonces resumirse en tan solo 30 días. Una vez cumplido el plazo, se estudian bajo el lente de un microscopio los estragos y se miden de forma cuantitativa y cualitativa cualquier minúsculo cambio en alguno de varios parámetros iniciales.

La mica de tereftalato de polietilenglicol (PETG) de las credenciales de elector tiende a amarillentarse, y no es para nada deseable que dicha cubierta plástica se desprenda del Teslin impreso en el interior (el Teslin es un papel sintético que va adherido a la mica y está compuesto por una mezcla de celulosa y polipropileno).

Sobre las licencias de conducir (que Canseco también prueba en su laboratorio) podemos remarcar que los materiales de los

cuales están hechas pueden ser de diferente naturaleza y de diferentes calidades, esto responde al precio que usted haya pagado por las mismas. Así, las más costosas son de materiales muy similares a las INE, y las más económicas pueden ser de otros materiales entre los que encontramos al cloruro de polivinilo (PVC). Estas últimas se vuelven quebradizas bajo la persistente exposición a los 350 nm de longitud de onda de la luz ultravioleta de la cámara de intemperismo (o su equivalente natural, el Sol).



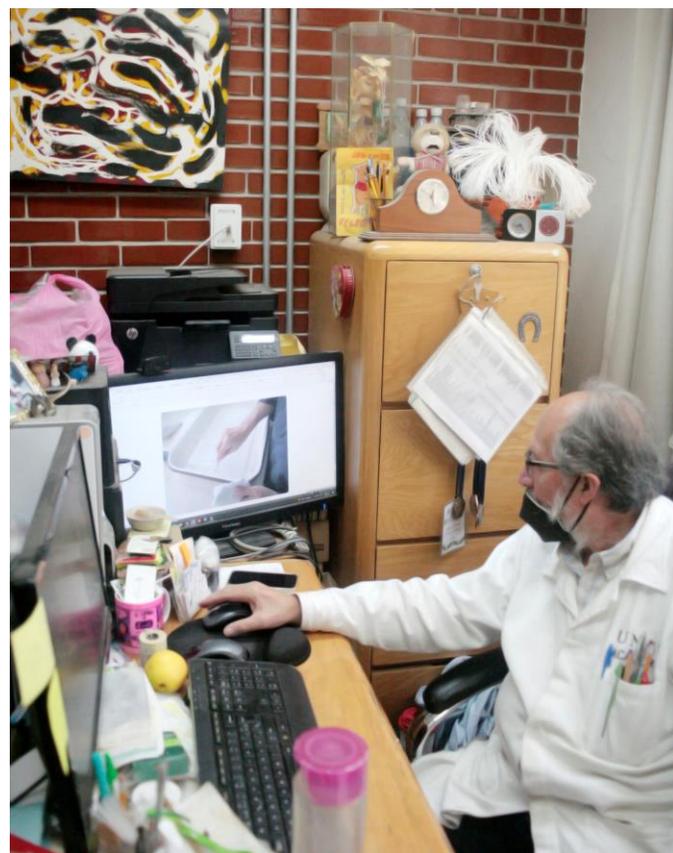
Igual que ocurre con los billetes y el dinero ahora circulante, existen muchísimos elementos de seguridad y datos curiosos encriptados dentro de nuestras identificaciones IFE e INE. A continuación, enlistaré tantos como el pacto de confidencialidad del científico Canseco con el estado mexicano le permitieron inquirir al poco discreto divulgador científico que escribe ahora para ustedes:

- El *gris IFE* es un color patentado que solo se utiliza para fabricar nuestras INE.
- El nombre de los 32 estados de la República aparece en el relieve mexicano del centro.
- El holograma de seguridad que está arriba del rostro está diseñado para dañarse irreversiblemente, en caso de intentar introducir una nueva fotografía.
- La franja negra en la parte trasera de los antiguos IFE es la más propensa a sufrir alteraciones, en las pruebas de intemperismo acelerado.
- La foto principal del rostro está ligeramente desfasada para lograr un efecto óptico en algunos equipos polarizados de autenticación.
- Con esta tecnología también fue posible esconder el nombre de la persona propietaria en la pequeña foto secundaria que se observa en el lado derecho.

- Las credenciales de elector deben tener una vida útil mínima de 10 años y también deben ser capaces de resistir varios ciclos de lavado dentro de una lavadora convencional. Ni Canseco ni yo les recomendamos verificar este último punto en casa.

## De las titulaciones en bureta a los espectros

Siendo pasante de la licenciatura en química, el investigador Miguel Ángel Canseco comenzó a trabajar para la compañía Roussel S.A. De estos años recuerda las valoraciones (no acusas) y análisis químicos cuantitativos que hacía utilizando ácido perclórico en el departamento de control de calidad. Se titularía tres años después con una tesis enfocada a la caracterización cromatográfica de resinas hechas a base de cloruro de polivinilo (PVC).



Uno de sus tíos estudió Químico Farmacéutico Biólogo, en Veracruz, así que él refiere que la química le ha gustado desde siempre. Reforzó este gusto durante la educación media superior que cursó en la Preparatoria 8 de la UNAM y recuerda que, desde la carrera en la Facultad de Química,

le gustó una asignatura llamada Plásticos y silicónes. En parte por eso llegó al Instituto de Investigaciones en Materiales, cuando se enlistó en un proyecto de investigación que buscaba una alternativa de película plástica para ser utilizada en alimentos, aunque me platica que luego *les ganarían el mandado* con la invención y mejoras del *Kleen Pack*. Sea como haya sido, él se quedó en este instituto y también en el estudio de los polímeros.

Podemos decir que pasó de la química analítica tradicional, que hacía en Roussel, a la química analítica instrumental dentro del instituto. Fue en el IIM-UNAM que hizo sus estudios de posgrado, recibiendo de la maestría doce años después de haber egresado de la Facultad. Comenzó a trabajar como Técnico académico asociado B, luego C, luego Técnico académico titular A y finalmente B de tiempo completo. Actualmente se le puede hallar al frente del Laboratorio de espectroscopía.



### Un poco de todo

Después del fatídico incendio de la guardería infantil ABC, acaecido en el norte del país hace una década, el temor social a nivel nacional no hizo más que aumentar y, con esto, el interés por estructuras más seguras. Fue en este fervor que el Consejo de la Judicatura Federal le comisionó a Miguel Ángel Canseco algunas pruebas de resistencia a la flama y determinación de la cantidad de fósforo (dentro de sus instalaciones), misma que midió mediante espectroscopía infrarroja en espumas de poliuretano utilizadas para construcción (este es utilizado como aislante térmico y acústico para los equipos de aire acondicionado). De forma contraintuitiva, y para mi sorpresa, me dijo que la concentración de fósforo en espumas de poliuretano no debe

exceder ciertos límites, pero tampoco debe estar por debajo de ciertas concentraciones, dando como resultado un rango seguro para este material en particular.

Regresando a nuestra vecindad, Canseco ha aportado sus conocimientos y trabajo a diversas instancias dentro de la UNAM: ha realizado pruebas a la ropa oficial de trabajo (Dirección General de Personal), al polipropileno utilizado en las paletas de las nuevas butacas para las aulas (Proveduría y Adquisiciones) y hasta al conocido piso translúcido de vidrio y polivinil butiral que se encuentra en el restaurante del Museo Universitario de Arte Contemporáneo, el MUAC, en zona cultural, gracias al cual podemos admirar el esplendor del pedregal bajo nuestros pies.



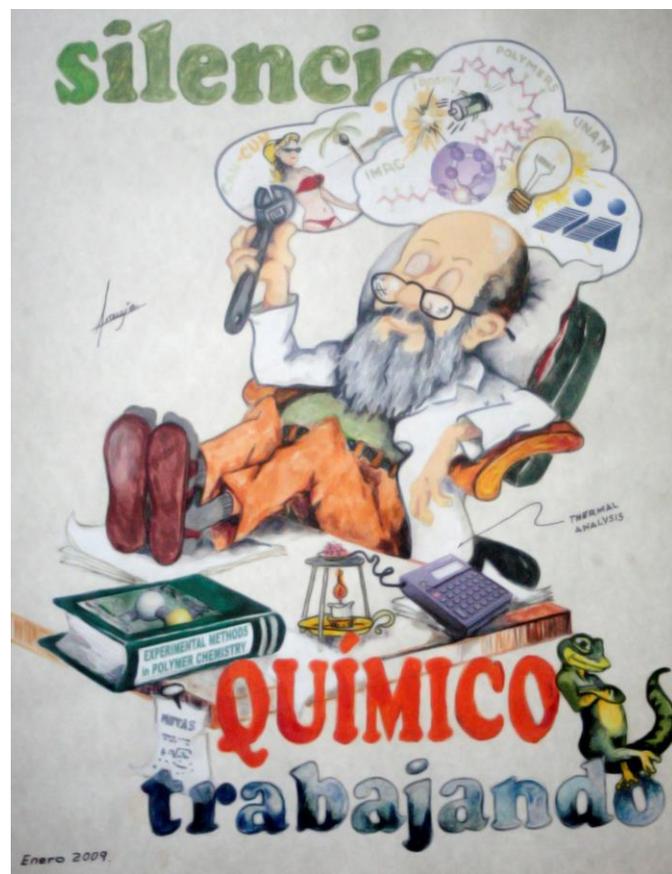
De su familia nuclear, Canseco es el único químico entre ingenieros y telegrafistas que ya se encuentran jubilados (de hecho, su abuelo materno es el autor del Himno del telegrafista). Su padre se dedicaba a trabajar la madera y yo en esto encuentro una bella coincidencia con uno de los estudios que realizó hace algunos años en Xalapa, Veracruz, sobre el desgaste de aglomerados de madera tras ser expuestos a una masa conocida de termitas (leyó bien; él pesó, con ayuda de una balanza y un vaso de precipitados, entre 5 y 10 g de termitas vivas para sus experimentos). De Chiapas estudió la resistencia química del ámbar y lo sometió a nada menos que 16 pruebas diferentes (en los 16 equipos con los que contaba en aquel momento). En material quirúrgico de acero inoxidable probó su resistencia a la corrosión, empleando una solución de sulfato de cobre. En colaboración directa con alumnado de la carrera de arquitectura estudió los impermeabilizantes para la naturación de azoteas y aplicación de materiales biodegradables y, regresando a las elecciones, el entonces Gobierno del Distrito Federal llegó a contactarlo para analizar la posibilidad de reutilizar las urnas electorales de

polipropileno corrugado, sin que estas perdieran su resistencia y ligereza. Con 40 años de trayectoria puede hacerse mucha ciencia útil (y tanto más que no terminaría de detallar).



## Soluciones

Su ecléctico trabajo es un verdadero reflejo del “diversificado y cosmopolita” uso que tienen los diferentes plásticos y polímeros, pero también es muestra de la gran diversidad de intereses personales que este investigador tiene por diferentes áreas del conocimiento científico y humano. Podemos verlo en sus estudiantes, formados en carreras que van desde las ciencias naturales y ciencias básicas, hasta alumnos titulados por él pertenecientes a las Facultades de Odontología, Arquitectura o Diseño industrial. Aquellas personas interesadas en realizar servicio social, tesis de licenciatura o estancias de investigación pueden acercarse a su laboratorio y formar parte de su equipo de trabajo.



Las vida y obra de Miguel Ángel Canseco nos recuerda que la ciencia básica se encuentra en los más inesperados aspectos de nuestra cotidianidad y que tiene mucho que aportar a la resolución práctica de los más diversos problemas.

## N. del E.

El presente texto fue ajustado a esta revista a partir de la nota de periodismo científico titulada “Una mirada a Canseco y sus plásticos”, publicada en el órgano informativo oficial la Gaceta de la UNAM, el lunes 5 de septiembre del 2022, escrita por el mismo autor. El presente texto corresponde a una versión extendida de dicha nota periodística disponible en:

<https://www.gaceta.unam.mx/una-mirada-a-miguel-angel-canseco-y-sus-plasticos/?fbclid=IwAR23LpAgPcaKMI59Ga78vtf-z65JGHryqA6N8YssEzcLpqlpKqCroIMhAUc>

# Breve historia del temple: de las espadas a los automóviles modernos

Helios Ocaña Ruiz<sup>1</sup>, Gonzalo González Reyes<sup>1</sup>,  
José María Cabrera Marrero<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Materiales,  
Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito  
Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, CDMX, México

<sup>2</sup>Department de Ciència i Enginyeria de Materials (CEM),  
EEBE, Campus Diagonal Besòs, Universitat Politècnica de  
Catalunya, Av. Eduard Maristany 10-14,  
08019 Barcelona, España

[helios@comunidad.unam.mx](mailto:helios@comunidad.unam.mx)  
[joseggr@unam.mx](mailto:joseggr@unam.mx)

De manera sencilla, el temple se puede entender como un proceso térmico de enfriamiento rápido, normalmente utilizando agua, hecho sobre un material con el fin de mejorar sus propiedades.

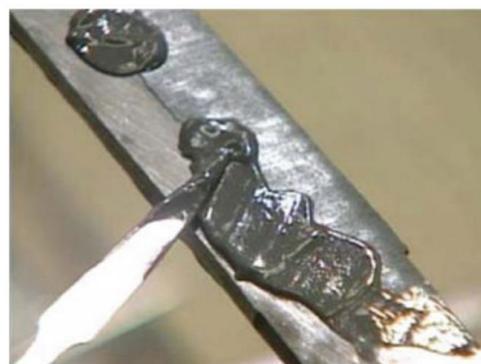
Los primeros materiales sobre los cuales se hicieron temples fueron los metales, en particular el hierro y el acero. Un ejemplo de ello fue el *acero de Damasco*, el cual estuvo rodeado de diferentes mitos sobre su producción. Se creía que al ser templado en la sangre de esclavos o de otros guerreros, estos depositaban su esencia sobre el hierro y, por lo tanto, lo endurecían aún más.

Es difícil señalar con exactitud la fecha del uso de templado en hierro y acero. Por mucho tiempo, este proceso estuvo

escondido detrás del misticismo concebido por los mismos herreros con el fin de proteger su profesión. De acuerdo con D. S. Mackenzie [1], uno de los primeros registros sobre el templado fue escrito por Homero, en su obra “La Odisea”:

“Como cuando un herrero sumerge una gran hacha en agua fría para templarla y esta chilla grandemente —este es el poder del hierro—”

Avances importantes se dieron en diferentes lugares del mundo, como en Japón, donde desde el siglo VI se popularizó el proceso del temple selectivo en espadas. Este consistía en aplicar una capa de arcilla mezclada con carbón alrededor de la espada. El grosor de la capa de arcilla variaba (Figura 1), siendo más delgada en el filo de la espada, lo que permitía una mayor transferencia de calor.



Grosor de  
la arcilla

**Figura 1. Aplicación de arcilla en espada:**  
Diferencias de espesor de la arcilla en el temple de espadas japonesas. Traducido de T. Inoue (2010)

Acto seguido, la espada era calentada hasta los 800-850°C, para después ser sumergida en agua. Ahí notaron que las zonas que tenían el recubrimiento delgado sufrían una transformación y endurecían, lo que era conveniente para mantener mejor el filo. Mientras que aquellas donde el recubrimiento era más grueso mantenían las propiedades originales del material, es decir, *el alma de la espada* se mantenía dúctil [2].

## El sinuoso camino para explicar el temple

A pesar de la complejidad de algunas técnicas de templado desarrolladas, como la utilizada en las espadas en Japón y el acero de Damasco, todo el conocimiento existente era empírico y no fue hasta finales del siglo XVI que se buscó dar

una respuesta más racional [3]. En 1639, René Descartes sustentó que, al calentar el acero, las partículas de fuego entraban dentro del material y lo volvían rojo. Al momento de templar en agua, dichas partículas de fuego eran reemplazadas por partículas de agua. Como estas tenían un menor tamaño, obligaban a los poros donde residían las antiguas partículas de fuego a encogerse y esto era lo que daba como resultado su endurecimiento [4]. Se sobreentendía entonces que existía un encogimiento del material producto del temple. Esta idea fue refutada en 1680, cuando Claude Perrault notó lo contrario: un incremento en el volumen del acero al templarlo. Esta observación obligó a la reformulación de una nueva teoría.

Años después, en 1722, Antoine de Réaumur propuso que el hierro consistía de dos tipos de partículas: partículas de hierro y partículas de “sales y sulfuros”. Réaumur argumentaba que las sales y sulfuros podían difundirse dentro de las partículas de hierro. Asimismo, afirmaba que por medio del calor se podían eliminar las partículas de “sales y sulfuros” de las partículas de hierro de forma que, al templar, las sales y sulfuros quedaban “congeladas” fuera del hierro, lo que daba una explicación racional (pero falsa) al aumento de volumen.

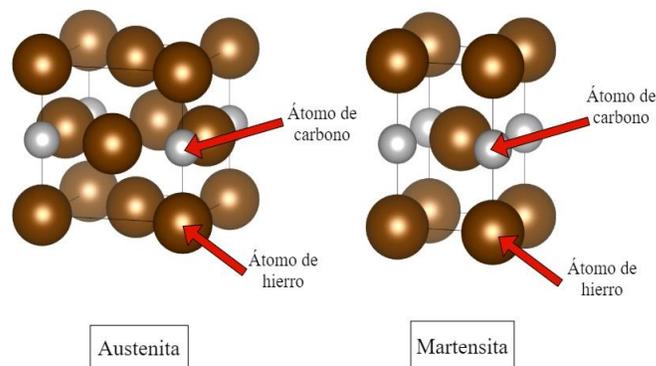
No fue hasta que Dmitri Chernov descubrió las temperaturas de transformación del acero que pudieron surgir mejores teorías sobre el temple. Las primeras de ellas sustentaban que, arriba de una cierta temperatura, existía un compuesto de hierro y carbono el cual era retenido gracias al rápido enfriamiento del temple. En 1895, Henri Howe unificó varias teorías y nombró al compuesto de hierro y carbono como *martensita*, en honor al metalurgista Adolf Martens.

De manera consecuente, Albert Sauveur propuso que había un compuesto que existía únicamente a altas temperaturas y cuyas propiedades podían ser “congeladas” por el proceso de templado. Este compuesto no era magnético y en 1903 Howe lo renombró como *austenita*. Gracias a eso se pudo explicar por qué el acero a temperatura ambiente era ferromagnético, mientras que a temperaturas elevadas no lo era.

## El temple como lo conocemos hoy en día

El concepto contemporáneo de temple tuvo que esperar a que se desarrollaran las técnicas que permiten analizar la estructura interna de los materiales, tales como la difracción de rayos X, en la década de 1920. Con ello se logró entender que los materiales están formados por fases, y que estas fases existen

en regiones muy particulares de temperatura. Particularmente en el acero, dos de estas fases son la austenita y la martensita, las cuales, a pesar de tener los mismos elementos químicos, tienen un acomodo atómico diferente (ver figura 2).



**Figura 2.** Diferencia del acomodo atómico entre dos fases del acero: austenita y martensita

Ahora sabemos que el temple del acero es la transformación de austenita a martensita gracias a un rápido enfriamiento, en el cual los átomos de carbono quedan atrapados dentro de la estructura austenítica [5]. No obstante, dependiendo de los diferentes parámetros y pasos que existen dentro del proceso se pueden llegar a formar fases diferentes, siendo una de ellas la *austenita retenida*. Esta ha tomado gran importancia en décadas recientes, ya que se ha demostrado que puede mejorar la resistencia a la fatiga y al impacto de los aceros [6]; propiedades que son muy importantes en la industria automotriz, y que han dado pie al desarrollo de aceros avanzados con *austenita retenida*.

## El temple y particionado

El principal desafío para obtener aceros con *austenita retenida* es que dicha fase debe pasar previamente por un proceso de estabilizado termodinámico puesto que, de otra forma, no podría existir a temperatura ambiente. Uno de estos procesos es conocido como *particionado*, en el cual se hacen difundir átomos de carbono desde la martensita hacia la austenita.

Para lograrlo, inmediatamente después del templado, el acero es recalentado a una temperatura específica. Esto permite el transporte de átomos de carbono entre fases, por lo cual es llamada temperatura de particionado.

A dicha temperatura, el carbono migra desde la zona de mayor concentración (fase martensítica) hacia la zona que tiene una

menor concentración (fase austenítica), con el fin de llegar a su estado de menor energía. Convenientemente, una vez que la austenita es enriquecida con carbono, su estabilidad aumenta y puede llegar a existir a temperatura ambiente, donde se le da el nombre de *austenita retenida*.

Una característica importante de los aceros con *austenita retenida* es que poseen una mayor capacidad de absorción de energía al impacto, ya que, al ser deformados, la austenita retenida puede transformarse de nuevo en martensita, produciendo un mecanismo adicional de endurecimiento conocido como efecto TRIP. Esto es de gran importancia en la industria automovilística, ya que se pueden utilizar láminas más delgadas para poder cumplir con los requisitos de seguridad (y así utilizar menos material). De igual forma, al tener menos peso, la eficiencia del combustible aumenta y se reduce la emisión de gases contaminantes.

## Los aceros del futuro

Podríamos pensar que el acero es un material sin grandes innovaciones, puesto que se conoce y utiliza desde hace siglos. No obstante, el desarrollo de aceros avanzados está lejos de ser algo del pasado: la mayoría de los procesos y modelos han sido planteados en años recientes y aún tienen muchas incógnitas por resolver.

Particularmente, en aceros de temple y particionado, los modelos teóricos que se han desarrollado hasta ahora únicamente pueden predecir la temperatura de temple óptima para obtener la máxima cantidad de austenita retenida. Sin embargo, dichos modelos no toman en cuenta ni el tiempo ni la temperatura de particionado para que se realice la difusión óptima de carbono. Lo anterior nos orilla a probar dichos tiempos de manera experimental; algo no tan distante a lo que se hacía cuando Homero describió el temple por primera vez. Afortunadamente, la mayoría de los resultados científicos obtenidos hoy en día son publicados, a diferencia de tiempos antiguos en los que cada herrero guardaba para sí los secretos de su proceso. Quizá gracias a esto no tengamos que esperar tantos siglos para poder progresar en este campo.

## Referencias

- [1] D. S. Mackenzie, "History of quenching" International Heat Treatment and Surface Engineering, 2:2, 68-73, 2013, DOI: 10.1179/174951508X358437.
- [2] T. Inoue, "Tatara and the Japanese sword: The science and technology," Acta Mech., vol. 214, no. 1-2, pp. 17-30, 2010, doi: 10.1007/s00707-010-0308-7.
- [3] J. Vanpamel. HISTORY OF THE HARDENING OF STEEL: SCIENCE AND TECHNOLOGY. Journal de Physique Colloques, 43 (C4), pp.C4-847-C4-854, 1982. ff10.1051/jphyscol:19824139ff. ffjpa00222126
- [4] R. Descartes, Los principios de la Filosofía. Barcelona: Alianza Editorial S.A., 1995.
- [5] David E. Laughlin, K. Hono, "Physical metallurgy" 5ed, Elsevier, 2014.
- [6] J. G. Speer, F. C. Rizzo Assunção, D. K. Matlock, and D. V. Edmonds, "The 'quenching and partitioning' process: Background and recent progress," Mater. Res., vol. 8, no. 4, pp. 417-423, 2005, doi: 10.1590/S1516-14392005000400010.



# Micomateriales: importados desde el reino de los hongos

Eduardo Hernández-Navarro

Departamento de Botánica,  
Instituto de Biología, UNAM, Circuito Zona Deportiva,  
Ciudad Universitaria, 04510, CDMX, México

[eduardo.hernandez@ib.unam.mx](mailto:eduardo.hernandez@ib.unam.mx)

## ¿Conoces los materiales hechos con hongos?

Si te pidiera ejemplos de materiales naturales provenientes de plantas seguro enlistarías al algodón, lino, madera, cartón o papel, y en los de origen animal al cuero, la lana y la seda. Pero si te preguntara sobre materiales hechos con hongos... ¿qué me dirías? Pues bien, se le denominan **micomateriales** a aquellos materiales producidos haciendo uso de los hongos, y se tratan de una fuente natural y sustentable.

Recordando tus clases de ciencias naturales, los hongos pertenecen a un reino distinto al de los animales y al de las plantas. Estoy hablando del reino de los hongos o reino *Fungi*. Esta palabra proveniente del latín y significa, literalmente, hongo, y a su vez esta deriva del griego “*sphongos*” o esponja. Estos organismos pertenecen a su propio reino y, de hecho, ¡son genéticamente más cercanos a los animales que a las plantas! Se han descrito más de ciento diez mil especies diferentes y se estima que pueden existir al menos un millón más que no han sido descubiertas (aunque algunos autores estiman que podrían existir entre cuatro y seis millones de especies en total, la mayoría microscópicas).

Los hongos cumplen roles ecológicos muy diversos. Pueden fungir como descomponedores de materia orgánica muerta, pero también pueden ser parásitos de plantas, animales e incluso de otros hongos. Muchos se asocian con otros organismos de una manera benéfica, como en el caso de los líquenes y las micorrizas. También hay especies que pueden alternar entre hábitos de vida, pasando de ser parásitos a descomponedores y viceversa. Pueden ser unicelulares, como las levaduras del pan y la cerveza, o ser pluricelulares y de esta forma producir células cilíndricas y alargadas (llamadas hifas). El conjunto de hifas es conocido como micelio y forma un tejido que a simple vista parece algodón. Los hongos presentan una pared celular similar a la de las plantas, pero esta no está compuesta de celulosa sino de quitina. Este duro polímero natural también está presente en los exoesqueletos y caparazones de algunos animales.

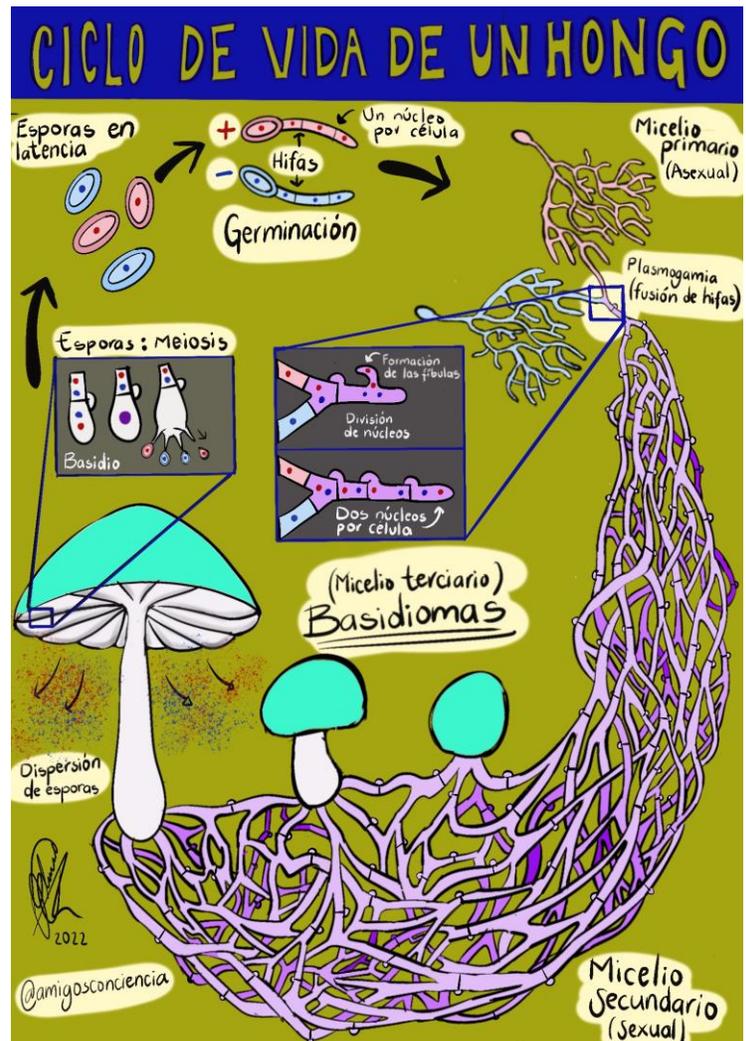


Figura 1. Ciclo de vida de un hongo basidiomiceto macroscópico

Ya sea como alimento o como herramienta ceremonial, los hongos nos han acompañado desde hace milenios, y hemos aprendido a usarlos a nuestro favor. Son fuente de muchos productos tales como el pan, fermentos alcohólicos, colorantes, enzimas, fármacos como antibióticos e inmunosupresores, y claramente la industria de los materiales no es la excepción. Estos fascinantes organismos excretan enzimas capaces de descomponer la materia adyacente en sustancias más simples, mismas que después serán absorbidas. Lo anterior es de gran utilidad para la *economía circular*, puesto que son una excelente alternativa para el manejo de residuos orgánicos agroindustriales, generando productos con valor agregado de por medio. Haciendo uso de los procesos (y los moldes) adecuados, pueden generarse los más diversos utensilios, muebles, armazones y demás objetos altamente resistentes (además de ser biodegradables).

## ¿Cómo pasan de ser hongos a materiales?

Existen muchas formas para pasar de los hongos a los materiales. Una de las más antiguas consiste en el forrajeo directo de los cuerpos fructíferos o **basidiomas** (figura 1). Este es el caso del **amadou**, proveniente del hongo yesquero (*Fomes fomentarius*, figura 2A) y de otros hongos poliporoides. El amadou es un tejido esponjoso que se encuentra dentro del basidioma, entre la piel o *pileipellis* y los tubos o himenio, que es de donde salen las esporas (figura 2B). Este tejido ha sido utilizado desde hace milenios como yesca para iniciar el fuego, tal como lo demostró el descubrimiento de la momia natural más antigua de Europa (el **Hombre de Similaun** o también apodado “Ötzi”). Sus restos de más de 5 255 años de antigüedad preservaron algunos trozos de amadou, que probablemente llevaba para su excursión alpina antes de morir y ser sepultado por la nieve, hasta su descubrimiento en septiembre de 1991.

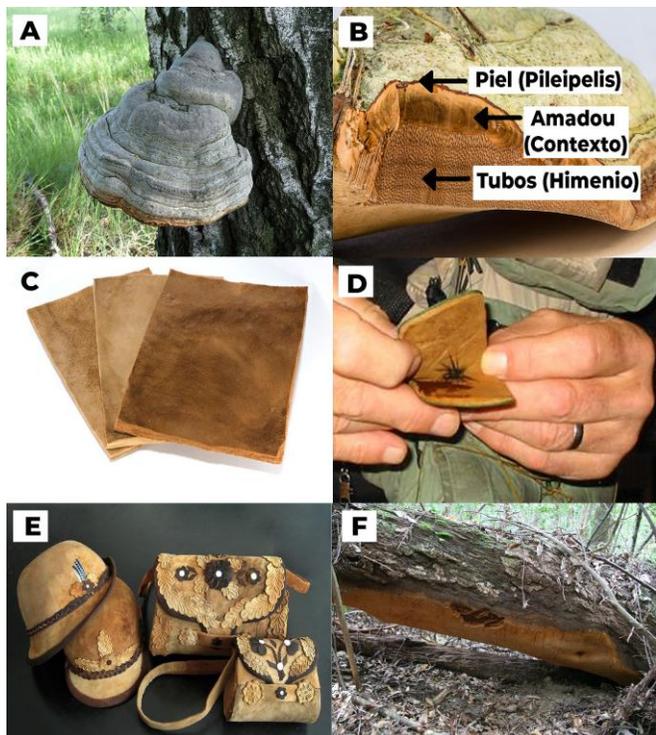
El basidioma (o cuerpo fructífero del hongo) puede encontrarse en la madera, ya que la especie es parásita de los árboles. Una vez que el árbol muere, el hongo sigue alimentándose del tronco. El cuerpo fructífero del hongo es entonces colectado para luego ser sumergido en agua. Después de cortarlo en tiras se separan las fibras. Antes de ser usado, el amadou debe ser aplanado, hervido o remojado en una solución de nitrato de potasio o carbonato de sodio. Al principio se trata de un material duro, pero después se suaviza a martillazos. Al final se logran obtener láminas de

amadou que asemejan mucho al cuero animal (figura 2C). Este material también resalta por ser altamente absorbente, incluso llegó a ser utilizado por los antiguos dentistas y cirujanos como material de curación. En la actualidad se le sigue usando en la pesca deportiva para secar a las carnadas (como, por ejemplo, moscas deshidratadas) (figura 2D). El amadou tiene la gran ventaja de ser maleable (con una textura parecida al corcho), respirable, absorbente y demás características que pueden ser aprovechadas en la confección de prendas como gorros, zapatos y guantes (Fig. 2E).

A pesar de sus ventajas, el amadou puede volverse frágil al mojarse. Para evitarlo, se aplican productos hidrofóbicos (que repelen el agua) similares a los usados en la fabricación de artículos de piel de animales. También presenta una baja resistencia al desgarre mecánico y a la tracción, así como una alta susceptibilidad a la abrasión. Esto se debe a su alto contenido de  $\alpha$ -glucano, que puede llegar al 53 % en peso seco. Esto puede mejorarse si laminamos al amadou con otros materiales tales como telas, lonas, papel, cartón. El rendimiento mecánico también puede mejorarse utilizando carnauba y otras ceras, así como diversos aditivos usados en la industria alimenticia y cosmética. Otra limitante es el tamaño de las láminas, que depende directamente del tamaño del basidioma. Las más grandes se obtienen de especies que generan basidiomas de gran tamaño, como es el caso de *Phellinus ellipsoideus*, que puede llegar a pesar casi 500 Kg (figura 2F); aunque también podrían utilizarse distintas especies. El forrajeo artesanal de basidiomas es interesante, pero su eficiencia no puede compararse con la de otras técnicas de cultivo de micelio en medios sólidos o líquidos, que veremos a continuación.

## Materiales basados en cultivo de micelio

De los basidiomas es posible también aislar el organismo para su cultivo. Una porción del contexto puede ser cortada y colocada en medios de cultivo típicos para hongos (como en agar extracto de malta), donde comenzará a desarrollarse el micelio de aspecto algodonoso. Este puede servir para generar nuevos basidiomas, en cultivos controlados en madera, o bien para procesos de fermentación en estado sólido o fermentación en estado líquido. Puede entonces cultivarse este y muchos otros hongos en el laboratorio, aprovechando residuos agroindustriales sólidos o en caldos nutritivos. El tipo de fermentación elegido influirá en las propiedades del material que se obtenga.



**Figura 2A.** Basidioma de *Fomes fomentarius*. **Fig. 2B.** Corte del basidioma. **Fig. 2C.** Hoja de amadou. **Fig. 2D.** Hoja de amadou usada en la pesca. **Fig. 2E.** Prendas de amadou. **Fig. 2F.** Un ejemplar de *Phellinus ellipsoideus* de más de 400 Kg

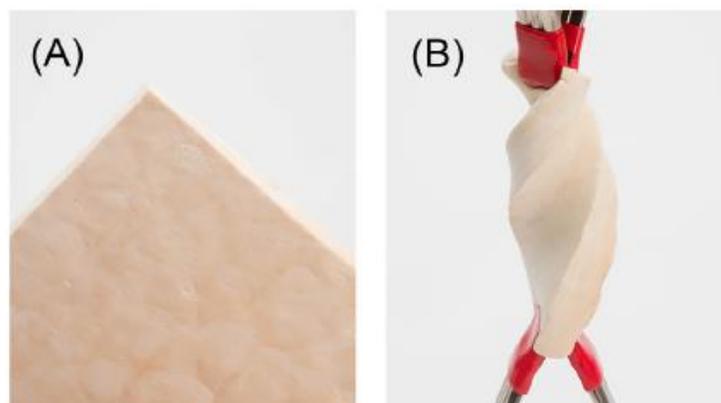
## Fabricación de esponjas y sustitutos de piel

La fermentación en estado sólido es la más popular para producir esponjas o sustitutos de piel animal. Para esto se inoculan porciones de micelio, provenientes de cajas petri o de semillas que fueron previamente inoculadas. Como sustrato se usan residuos lignocelulosídicos, como el aserrín o el rastrojo de maíz, mismos que son enriquecidos con otros nutrientes minerales y carbohidratos simples (como la melaza). La selección de la cepa y del sustrato son los elementos más importantes para este tipo de fermentación, y los hongos más usados son los Polyporales en estado sexual (especialmente el género *Ganoderma*, aunque otras especies saprobias también pueden ser utilizadas). El crecimiento del hongo puede realizarse de manera dirigida, haciendo uso de moldes que tengan la forma final deseada. Con el correcto manejo y control de variables como la temperatura, humedad, niveles de luz y aireación pueden obtenerse hojas de micelio esponjoso con las propiedades deseadas. Altas concentraciones de dióxido de carbono (5-7 %) y temperaturas elevadas (30-35°C) son importantes para evitar que el hongo produzca basidiomas.

Para evitar que el micelio se adhiera a los moldes suelen emplearse capas intermedias permeables entre el molde y el sustrato. Utilizar residuos agroindustriales también reduce los costos y la fermentación en estado sólido se vuelve mucho más competitiva que la fermentación en estado líquido. Además, no se necesita aireación adicional ni agitación mecánica dentro de costosos biorreactores (aunque sí deben monitorearse algunos parámetros básicos).

La fermentación en estado sólido ofrece muchas ventajas para la producción de sustitutos de cuero: usa poca agua, menos energía y tiene menores requerimientos asépticos y mayor producción. En conjunto, el bajo riesgo de contaminación, baja inversión y la relativa simplicidad de los sistemas de fermentación sólida los vuelve idóneos para ser desarrollados en lugares con poco acceso tecnológico (además de ser fácilmente adaptables a instalaciones agroindustriales ya existentes). No obstante, tanto la dependencia del perfil de nutrientes como la distribución y densidad del inóculo dan como resultado tiempos prolongados de colonización del sustrato y deficiencias en la morfología de las hifas y el micelio. La distribución de las semillas del inóculo causa variabilidad en las tasas de crecimiento y en las estructuras fúngicas (tanto en la superficie como dentro del sustrato), provocando discontinuidad en la densidad, grosor y pigmentación de los colchones de micelio.

Otro de los retos a enfrentar es la escalabilidad, puesto que las variaciones de parámetros como la humedad, pH e intercambio de gases son mucho más difíciles de controlar que en los sistemas de fermentación en estado líquido.



**Figura 3A.** Esponja fúngica extendida. **Fig. 3B.** Enrollada

Las esponjas fúngicas son basadas, ya sea en micelio puro aislado del sustrato, o en una combinación de micelio con material lignocelulosídico (como el trigo, algodón, fibras de hemp). Estas fibras de material vegetal se ven entrelazadas por

las hifas durante el proceso de descomposición del sustrato. Se ha demostrado que dichas esponjas compuestas de micelio son materiales versátiles para una gran gama de aplicaciones tales como empaques, aislamiento térmico (y acústico) y materiales de construcción semiestructurales. Incluso se ha empleado al hongo en estado sexual *Trichoderma reesei* para la elaboración de almohadillas para audífonos.

## Fabricación de sustitutos de papel

Los materiales sustitutos de papel de origen fúngico pueden tener muchas ventajas sobre el papel tradicional derivado de la pulpa de madera (véase la figura 4). Esto incluye una resistencia superior a la tracción, resistencia a quemaduras, estabilidad ante solventes, quelación de metales pesados e incluso propiedades curativas, cuando son empleados para vendajes o material de curación.



Figura 4. Láminas de papel fúngico

La fermentación en estado líquido es la técnica más utilizada para la fabricación de papel a base de hongos y otros materiales similares. Para esto, una pequeña porción del micelio aislado (proveniente de una placa de cultivo) es inoculada en el caldo nutritivo donde se desarrollará. Esta técnica tiene menores tiempos de cultivo, mejor escalabilidad y menores requerimientos en términos de espacio, pues pueden producirse pellets fúngicos compactos que después habrán de ser convertidos en pulpa para fabricar, entre otros, materiales afines al papel.

La separación del micelio obtenido se realiza fácilmente mediante filtración. Esto también facilita la cosecha de micelio puro como fuente de quitina o quitosano. No obstante, la fermentación en estado líquido es muy sensible a la contaminación microbiana, por lo que son necesarias condiciones de trabajo, materiales y caldos de cultivo

totalmente estériles. La viabilidad comercial se propone a partir de volúmenes superiores al millón de litros, usando biorreactores industriales. Estos emplean corrientes de desechos líquidos aireados y agitados, tales como licor de maceración, almidón hidrolizado o melaza adicionada con minerales. Para estas fermentaciones se utilizan hongos de varios *phyla* diferentes, ya sea en fase asexual o sexual. Incluso se han usado otros organismos diferentes (pero afines) a los hongos, como en el caso de algunos protistas como los mixomicetos y algunos cromistas de la clase Oomycota.

El tamaño del inóculo, temperatura, velocidad de agitación, disponibilidad de oxígeno, pH y la composición del medio líquido tienen que ser adecuadas para cada especie que se cultiva. Es por ello que el monitoreo automático de dichos parámetros constituye un alto costo (y requiere de mayor energía). Los sistemas estáticos de fermentación son un poco más simples y representan una alternativa de menor costo para producir biomasa fúngica de formas y tamaños muy variables (aunque requieren mayor tiempo de incubación, comparado con los fermentadores con agitación).

La fermentación ocurre en recipientes poco profundos o bandejas, de las cuales el colchón de micelio se cosecha una vez que ha alcanzado el grosor deseado. En este proceso se han usado especies de basidiomicetos de los géneros *Schizophyllum*, *Ganoderma* y *Pleurotus*. El tiempo de incubación es de varios días, antes de pasar al secado a temperatura ambiente y obtener los materiales deseados. Técnicas similares han sido usadas para generar colchones de micelio flotante de algunos hongos ascomicetos asexuales (como *Aspergillus* en caldo de dextrosa y papa) para su uso como andamios fúngicos biomiméticos, en la ingeniería de tejidos humanos.

**El enorme potencial de esta tecnología se debe al impacto que puede lograr en la mejora de la sostenibilidad ambiental mundial**

## Fabricación de materiales rígidos

La fermentación en estado sólido también se ha empleado para la elaboración de materiales rígidos, como por ejemplo algunos empaques, cascos de seguridad, materiales de construcción e incluso muebles. Nace así la **micotectura**, que es una rama de la arquitectura que utiliza materiales de origen fúngico para la construcción. Uno de sus principales exponentes es Phill

Ross, conocido por la producción de ladrillos (a base de micelio de una especie de *Ganoderma*) para la construcción de muros, arcos y otras estructuras.



**Figura 5.** Izquierda: construcción a base de ladrillos fúngicos; derecha: ataúd “capullo viviente”

Estas aplicaciones de micomateriales son un pequeño ejemplo de cómo los hongos mejoran nuestra calidad de vida, y no solo eso, también pueden mejorar nuestra muerte. Tal es el caso del “capullo viviente”, un ataúd creado a partir de micelio que fue elaborado por Bob Hendrixx, investigador de la Universidad Técnica de Delft. Este método genera un ataúd biodegradable, pero no solo eso, el micelio del hongo puede reactivarse una vez que sea enterrado (mejorando así las condiciones del suelo circundante, eliminando las sustancias tóxicas del mismo y enriqueciendo el terreno para el crecimiento de nuevas plantas). Si consideramos que la mayoría de los ataúdes son fabricados de metal; que el embalsamamiento no permite una descomposición adecuada de los restos humanos, y que los cementerios se convierten en terrenos no productivos, el uso de estos ataúdes biológicos (combinado con la creación de bosques funerarios) podría mejorar las condiciones del suelo y aumentar la reforestación. Estos ataúdes tardan más o menos una semana en crecer y, una vez que contienen los restos humanos, tardan de dos o tres años en descomponerse.

## Conclusiones y perspectivas

Podemos ver que los micomateriales son bastante versátiles en cuanto a sus propiedades y métodos de producción. Representan una alternativa sustentable para el manejo de diversos residuos, tanto sólidos como líquidos, además de ser buenos sustitutos para materiales que tienen un mayor impacto ambiental, como las pieles de animales, los plásticos, papel e incluso metales.

En cuanto a las perspectivas, es necesario optimizar los protocolos de fermentación (tanto líquida como sólida),

así como la investigación en ciencia básica que nos permita explorar otras especies de hongos que pudieran ser más eficientes en la biotransformación de residuos.

## Referencias

Artículos científicos y libros:

- Antinori, M.E. et al. (2020) Fine-tuning of physicochemical properties and growth dynamics of mycelium-based materials. *ACS Appl. Bio Mater.* 3, 1044–1051
- Gandia, A., van den Brandhof, J. G., Appels, F. V., & Jones, M. P. (2021). Flexible fungal materials: shaping the future. *Trends in Biotechnology*, 39(12), 1321-1331.
- Herrera, T., & Ulloa, M. (2004). *El reino de los hongos*. Micología básica y aplicada. Primera Reimpresión. UNAM.
- Hölker, U. et al. (2004) Biotechnological advantages of laboratory-scale solid-state fermentation with fungi. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 64, 175–186
- Krishna, C. (2005) Solid-state fermentation systems – an overview. *Crit. Rev. Biotechnol.* 25, 1–30
- Narayanan, K.B. et al. (2020) Novel biomimetic chitin–glucan polysaccharide nano/microfibrous fungal-scaffolds for tissue engineering applications. *Int. J. Biol. Macromol.* 149, 724–731
- Peintner, U. and Pöder, R. (2000) Ethnomycological remarks on the Iceman’s fungi. In *The Iceman and His Natural Environment*, pp. 143–150, Springer
- Stamets, P. (2005) *Mycelium Running: How Mushrooms Can Help Save the World*, Ten Speed Press
- Yousefi, N. et al. (2020) Fungal chitin–glucan nanopapers with heavy metal adsorption properties for ultrafiltration of organic solvents and water. *Carbohydr. Polym.* 253, 117273

Sitios Web:

- <https://inarquia.es/micotectura-uso-posibilidades-micelio-hongos-arquitectura/>
- <https://www.dezeen.com/2022/05/17/mycelium-cycle-helmet-myhelmet-studiomom/>
- <https://www.tree-hugger8.net/mycotecture-mushroom-bricks-philip-ross-4857225>
- <https://www.tree-hugger8.net/living-cocoon-eco-friendly-coffin-made-with-fungi-5097275>



# Nanocapa SakCu<sup>®</sup>: ¿Por qué inactiva a los virus?

Ana Martínez Vázquez<sup>1</sup>, J. M. Bello-Lopez<sup>2</sup>,  
P. Silva-Bermudez<sup>3</sup>, G. Prado<sup>4</sup>, C. Ramos-Vilchis<sup>1</sup>,  
R. de la Torre<sup>1</sup>, Gabriela Ibáñez-Cervantes<sup>2</sup>,  
Mónica Alethia Cureño-Díaz<sup>2</sup>,  
A. Almaguer-Flores<sup>5</sup>, S. E. Rodil<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior sn, Ciudad Universitaria, 04510 CDMX, México

<sup>2</sup> Dirección de Investigación. Hospital Juárez de México. Av. Instituto Politécnico Nacional 5160, Magdalena de las Salinas, Delegación Gustavo A. Madero, 07760, CDMX, México

<sup>3</sup> Unidad de ingeniería de Tejidos, Terapia Celular y Medicina Regenerativa; Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra-Ibarra; Av. México-Xochimilco No. 289. Col. Arenal de Guadalupe C.P. 14389, CDMX, México

<sup>4</sup> Laboratorio de Biotecnología; Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra-Ibarra; Av. México-Xochimilco No. 289 Col. Arenal de Guadalupe C.P. 14389, CDMX, México

<sup>5</sup> Laboratorio de Biointerfases, Facultad de Odontología, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, CDMX, México

[martina@iim.unam.mx](mailto:martina@iim.unam.mx)

## Resumen

En el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM se desarrolló una nanocapa de plata-cobre registrada como SakCu<sup>®</sup> para su uso como material filtrante con propiedades antivirales en cubrebocas reutilizables. Los cubrebocas hechos con este material inactivan en un 80 % al virus SARS-CoV-2 después de cuatro horas de contacto. En este artículo se expone un modelo teórico basado en la química cuántica, que permite encontrar una explicación de cómo es que esta monocapa puede funcionar contra el virus. La explicación radica en la capacidad que tiene la nanocapa plata-cobre para oxidar la membrana del virus.

## Introducción

Hablar de la pandemia en estos días ya no resulta novedoso ni tampoco atractivo. Todas y todos estamos ante una situación de hastío y ya no queremos hablar mucho del tema; sin embargo, seguimos viviendo los abatares del virus y sus variantes, y habremos de seguirnos protegiendo. Ante esta emergencia sanitaria necesitamos utilizar equipos de protección personal, ya que estos representan el mejor método de prevención. Esto también nos permitirá regresar a las actividades presenciales que tanta falta hacen para preservar la salud mental de todas y todos. Ante este panorama, parece que el uso de cubrebocas habrá de convertirse en una necesidad durante los próximos años [2].

En un artículo previo [1] se explicó paso a paso el desarrollo conceptual y experimental de la nanocapa de plata-cobre registrada como SakCu<sup>®</sup> para su uso como material filtrante con propiedades antivirales en cubrebocas reutilizables. Los cubrebocas hechos con este material inactivan en un 80 % al virus SARS-CoV-2 después de cuatro horas de contacto. Explicamos entonces que la nanocapa no presenta citotoxicidad ni representa un peligro para aquellas personas que usamos este cubrebocas como medida de prevención ante la Covid-19.

Como ya todos sabemos, SARS-CoV-2 es un virus con la capacidad de infectar a nivel de la garganta y de los pulmones. Dependiendo de la carga viral, si la infección permanece en la garganta los síntomas pueden ser menores y la tasa de mortalidad es reducida (~1%). Cuando la carga viral es alta y alcanza los pulmones, la infección puede ser severa y se puede alcanzar una tasa de mortalidad diez veces mayor [3, 4]. El tipo de infección está determinado por los modos de transmisión, que pueden ser gotas, aerosoles, contacto directo con gotas o a través de superficies contaminadas [5,6]. Una medida de prevención es el uso de mascarillas que eviten el contacto con gotas o aerosoles provenientes de personas infectadas, o bien lavando continuamente las manos y las superficies [7-9]. En particular, las mascarillas protegen porque filtran partículas y bacterias, pero esto depende de la calidad de la mascarilla y del ajuste a la cara, entre otras cosas.

Una forma de aumentar el nivel de protección es mediante el uso de la nanocapa metálica SakCu<sup>®</sup> que presentamos en un artículo previo [1]. Esta investigación surgió como una propuesta presentada a la Secretaría de Educación, Ciencia

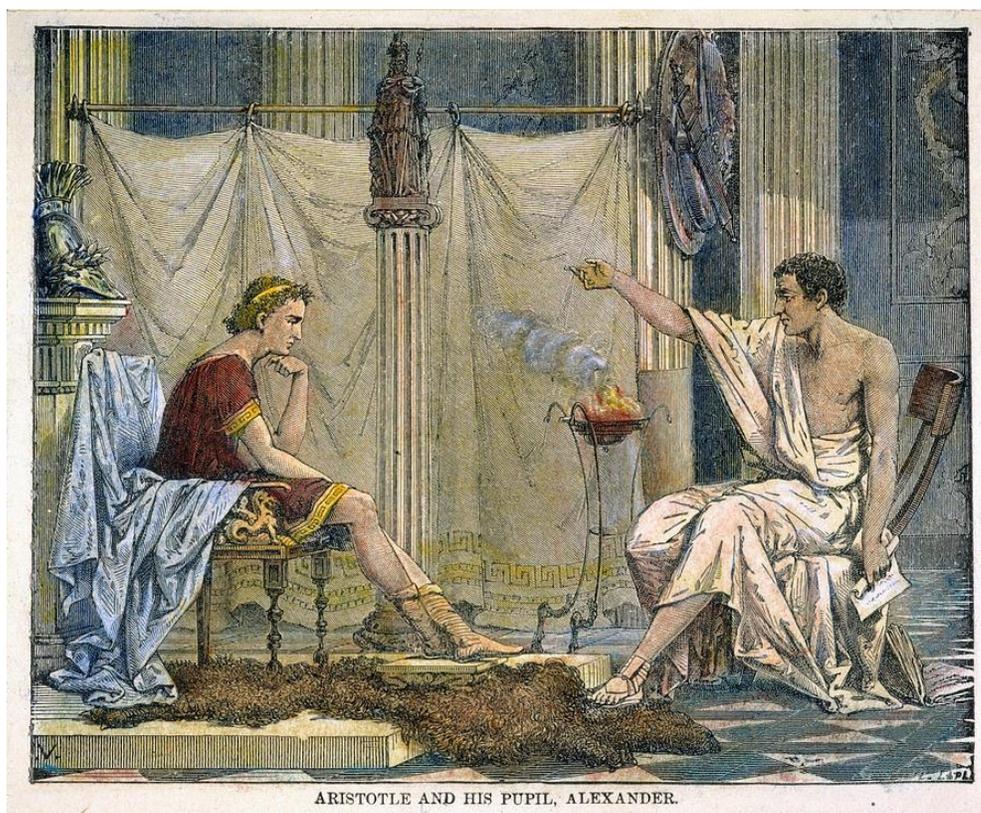
Tecnología e Innovación (SECTEI) de la Ciudad de México, que tiene como objetivo desarrollar materiales funcionales que además de ser filtros físicos tengan propiedades antimicrobianas, es decir, puedan inactivar el virus e inhibir el crecimiento de bacterias y hongos. Esto se logró en este proyecto usando nanocapas de plata-cobre pero, ¿de dónde vino la idea de utilizar estos metales?

Desde las épocas de Alejandro Magno se sabía, de manera empírica, que la plata mataba a las bacterias. Estamos hablando del siglo 335 a.C. En aquél entonces, Aristóteles decía utilizar un fino polvo de plata al que llamaba *flor de plata* (figura 1). Esto se utilizaba principalmente sobre las heridas de los soldados, lo que evitaba que se infectaran y ayudaba a la cicatrización. Los romanos echaban monedas de plata al agua que iban a beberse con el mismo propósito. También los emperadores chinos, así como las dinastías egipcias y fenicias, utilizaban a la plata para sus cubiertos y vasijas. Empíricamente se reconocían las propiedades antibacterianas de la plata y así, durante muchos siglos, sin saber cómo funcionaba, la plata se utilizaba para prevenir enfermedades. Hoy se sabe que la plata es capaz de acabar con todo tipo de gérmenes, bacterias, hongos, virus y protozoos.

La explicación reportada [10] se basa en los iones de plata, que al contacto con las membranas de los gérmenes entran en la bacteria, donde las enzimas se conjugan con la plata perdiendo su funcionalidad, y con esto el bicho muere. Esto es una explicación a muy grandes rasgos. La pregunta en este trabajo es sobre la nanocapa. ¿Por qué la monocapa plata-cobre inactiva al virus?

## Nanocapa de plata-cobre; ¿por qué plata y cobre?

Los resultados experimentales indican que la nanocapa de plata-cobre es capaz de inhibir el crecimiento de virus como el SARS-CoV-2, pero no afecta a otros virus como el del papiloma humano. La diferencia entre ambos es la capa de fosfolípidos que envuelve al virus de la covid, pero no al virus que produce el papiloma humano. Por eso pensamos que el principal mecanismo de acción está en la interacción de plata y cobre con la capa de fosfolípidos que rodea al virus. Esta misma capa de fosfolípidos es la que destruimos cuando nos lavamos las manos con jabón, evitando así la infección.



**Figura 1.** Aristóteles y su alumno, Alejandro Magno.  
Grabado de Charles Laplante

Con la idea de formular un modelo que nos permitiera explicar lo que se estaba observando en el laboratorio con esta nanocapa de plata-cobre [1,11] nos dimos a la tarea de hacer cálculos de química cuántica. Utilizamos tres modelos o representaciones para los fosfolípidos (ver figura 2), que son phosphatidylethanolamine (PE), que es uno de los lípidos más abundantes en las células de los mamíferos y de los virus [12, 13]; phosphatidylcholine (PC), que forma parte de la membrana celular y es el precursor de ciertos fosfolípidos (además de tener propiedades antioxidantes *in vivo* [14]), y por último, phosphatidylserine (PS), que también está en las membranas celulares [15]. Así mismo, analizamos un modelo del polipropileno (PP), que es un polímero ampliamente utilizado en la manufactura de textiles. Al polipropileno le enlazamos plata y cobre como se observa en la figura 2. Todas estas estructuras las optimizamos y calculamos sus propiedades electrónicas [11].

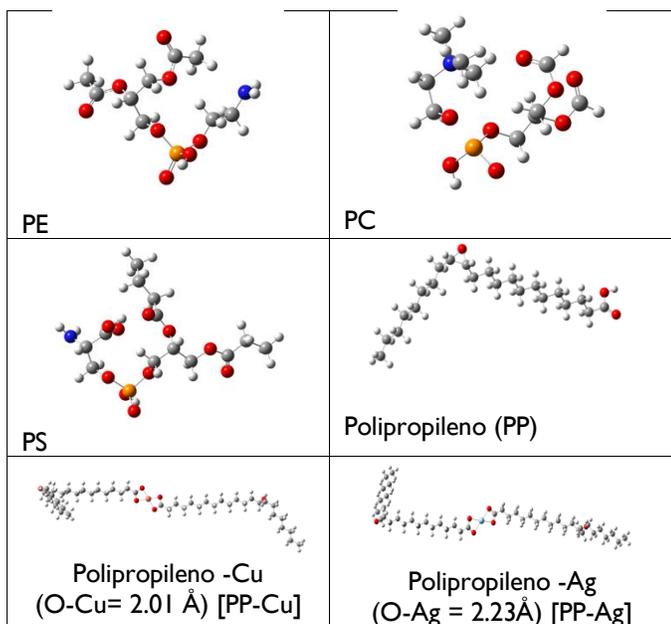


Figura 2. Estructuras optimizadas de los modelos utilizados en este trabajo

La idea principal de este estudio teórico es la de investigar las propiedades de donar y aceptar electrones, y el efecto que tiene sobre estas capacidades la presencia de los metales. Para hacer este análisis utilizamos un mapa donador aceptor de electrones (DAM por sus siglas en inglés) [16, 17]. El DAM se presenta en la figura 3 y es una magnífica herramienta para analizar la transferencia de electrones entre las especies químicas. Se basa en dos cantidades: el poder electroceptor ( $w^+$ ) y el poder electrodonador ( $w^-$ ) definidos previamente

por Gázquez *et al* [18]. Un valor grande de  $w^+$  implica que la especie química es buena **aceptora** de electrones. Un valor pequeño de  $w^-$  significa que la especie es buena **donadora**. En el mapa se marcan las regiones donde aparecerán los donadores y los aceptores. Los electrones van a fluir del buen donador hacia el buen aceptor.

En la figura 4 se presenta el DAM de las sustancias que analizamos. Se observa que el polipropileno (PP) y los fosfolípidos etiquetados con PE, PC y PS se localizan en la sección de buenos donadores de electrones (abajo, a la izquierda). La presencia de metales como  $Cu^{+2}$  y  $Ag^{+1}$  produce compuestos que son buenos aceptores de electrones, siendo los compuestos con plata los mejores aceptores (está arriba, a la derecha del mapa).

De acuerdo con estos resultados, PP-Cu y PP-Ag (figura 2) pueden aceptar electrones de los fosfolípidos PE, PC y PS, que pueden estar formando la membrana de los virus. Aceptar electrones de los fosfolípidos significa que PP-Cu y PP-Ag ganan electrones y que PE, PC y PS los pierden, es decir, los fosfolípidos se oxidan (porque oxidarse es precisamente perder electrones). La conclusión es que el polipropileno que se utiliza en los textiles no puede aceptar electrones de los fosfolípidos del virus, pero cuando lo colocamos en presencia de metales como la nanocapa de plata-cobre entonces sí tiene esa capacidad de aceptarlos. Los fosfolípidos se oxidan y con eso se desestabiliza la membrana. Este proceso es similar al que sufren algunos alimentos cuando se descomponen por oxidación de los lípidos.

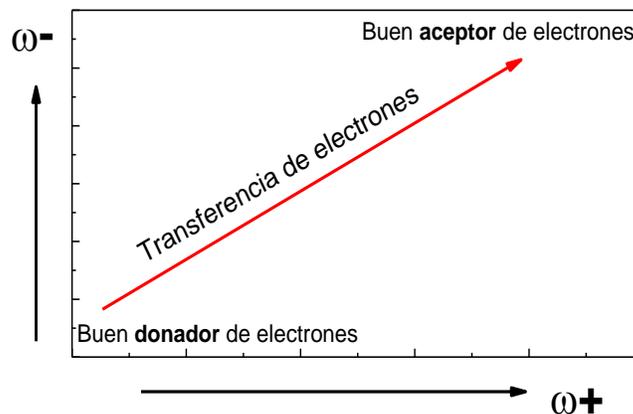
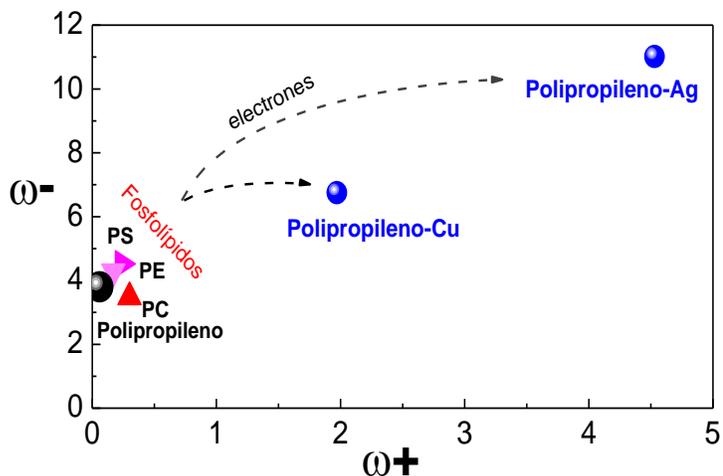


Figura 3. DAM (Donor Acceptor Map)

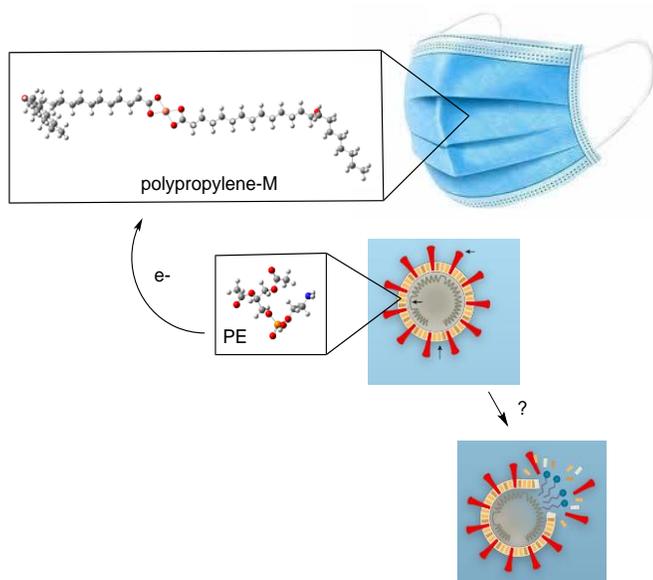
En resumen, lo que hacemos al colocar la nanocapa plata-cobre es añadir un oxidante a la tela: un compuesto capaz de quitarle electrones a los fosfolípidos, porque este es un buen aceptor de electrones. Esto destruye la capa de fosfolípidos del virus y, con esto, los inactiva.



**Figura 4.** DAM con los compuestos analizados en esta investigación. PP-Cu y PP-Ag se refieren a las estructuras en la parte inferior de la figura 2

Un esquema de este mecanismo se presenta en la figura 5. La nanocapa plata-cobre colocada en el textil está representada por el polipropileno-M. Esta nanocapa acepta electrones del fosfolípido que forma la membrana del virus, y esto hace que la membrana se rompa y el virus se inactive.

Lo interesante de este trabajo es que, además de haber encontrado una forma mucho más eficaz de protegernos contra el SARS-CoV-2 (la cual demostramos que no es tóxica para las células humanas), pudimos explicar el mecanismo de acción con un modelo sencillo.



**Figura 5.** Esquema del mecanismo de acción de la nanocapa plata-cobre

## Referencias

[1] J. M. Bello-Lopez, P. Silva-Bermudez, G. Prado, C. Ramos-Vilchis, Ana Martínez, R. de la Torre, Gabriela Ibáñez-Cervantes, Mónica Alethia Cureño-Díaz, A. Almaguer-Flores, S. E. Rodil. *Nanocapa SakCu®: Diseño Conceptual y Desarrollo*. *Materiales Avanzados* (2021) num. 35, 78-95

[2] L.V. Tse, R.M. Meganck, R.L. Graham, R.S. Baric, *Frontiers in Microbiology*, 11 (2020).

[3] D. Cyranovsky, *Nature*, 581 (2020) 22-26.

[4] H. Ledford, *Nature*, 580 (2020) 311-312.

[5] H. Huang, C. Fan, M. Li, H.-L. Nie, F.-B. Wang, H. Wang, R. Wang, J. Xia, X. Zheng, X. Zuo, J. Huang, *ACS Nano*, 14 (2020) 3747-3754.

[6] N. van Doremalen, T. Bushmaker, D.H. Morris, M.G. Holbrook, A. Gamble, B.N. Williamson, A. Tamin, J.L. Harcourt, N.J. Thornburg, S.I. Gerber, J.O. Lloyd-Smith, E. de Wit, V.J. Munster, *New England Journal of Medicine*, 382 (2020) 1564-1567.

[7] A.W.H. Chin, J.T.S. Chu, M.R.A. Perera, K.P.Y. Hui, H.-L. Yen, M.C.W. Chan, M. Peiris, L.L.M. Poon, *The Lancet Microbe*, 1 (2020) e10.

[8] S.B. Kasloff, A. Leung, J.E. Strong, D. Funk, T. Cutts, *Scientific Reports*, 11 (2021) 984.

[9] L. Morawska, J. Cao, *Environment International*, 139 (2020) 105730.

[10] S. Medici, M. Peana, V.M. Nurchi, M.A. Zoroddu, *J. Med. Chem.* 62 (2019) 5923–5943. [doi:10.1021/acs.jmedchem.8b01439](https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.8b01439). [PMID 30735392](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30735392/).

[11] J. M. Bello-Lopez, P. Silva-Bermudez, G. Prado, Ana Martínez, Gabriela Ibáñez-Cervantes, Mónica Alethia Cureño-Díaz, L. Rocha-Zavaleta, J. Manzo-Merino, A. Almaguer-Flores, C. Ramos-Vilchis, Sandra E. Rodil. *Biomedical Materials* 17 (2022) 015002

[12] M.F. Poyton, A.M. Sendeci, X. Cong, P.S. Cremer, *J. Am. Chem. Soc.* 138 (2016) 1584-90.

[13] X. Carnec, L. Meertens, O. Dejarnac, M. Perera-Lecoin, M. Lamine Hafirassou, J. Kitaura, R. Ramdasi, O. Schwartz, A. Amara. *J. Virol.* 90 (2016) 92-102.

[14] P. Kidd, *Altern. Med. Rev.* 7(2) (2002) 150-4.

[15] P. Kidd, *Altern. Med. Rev.* 1(1) (1996) 70-84.

[16] A. Martínez, M.A. Rodríguez-Gironés, A. Barbosa, M. Costas, *J. Phys. Chem. A* 112(38) (2008) 9037-9042.

[17] A. Martínez, *J. Phys. Chem. B* 113(14) (2009) 4915-4921.

[18] J.L. Gázquez, *J. Mex. Chem. Soc.* 52 (2008) 3-10.

# Dendronización como estrategia para mejorar el desempeño terapéutico de sistemas moleculares

Luis José López-Méndez<sup>1,2</sup>, Neyra C. Cabrera-  
Quiñones<sup>1</sup>, Julia Cassani Hernández<sup>2</sup>,  
Patricia Guadarrama-Acosta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM  
Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, 04510, CDMX

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco,  
Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, Alcaldía de  
Coyoacán, C.P. 04960, CDMX

[luisiim2g@gmail.com](mailto:luisiim2g@gmail.com)

## Introducción

Desde que D. A. Tomalia reportó su estrategia para la síntesis de dendrímeros en 1985, la arquitectura dendrítica ha sido utilizada en un sinnúmero de aplicaciones, las cuales van desde la generación de antenas moleculares, catalizadores, y en el contexto de biomedicina, como agentes acarreadores de fármacos capaces de incrementar su solubilidad, estabilidad e incluso dirigirlos a un sitio específico en el organismo [1].

La versatilidad de los sistemas dendriméricos se debe en gran medida a la libertad que se tiene de seleccionar cada uno de sus componentes estructurales (Fig. 1).

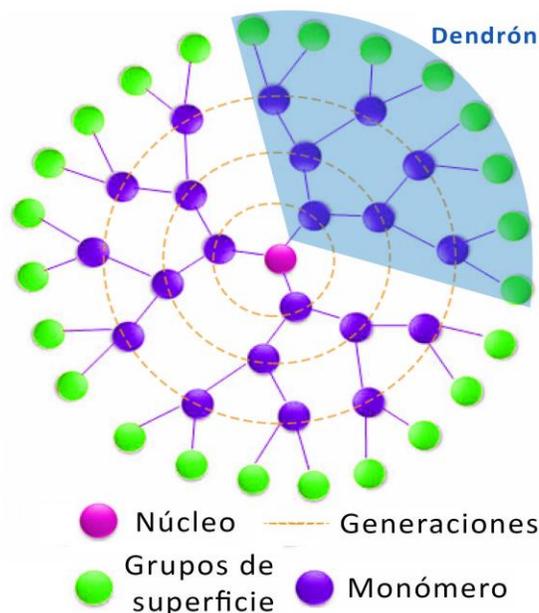
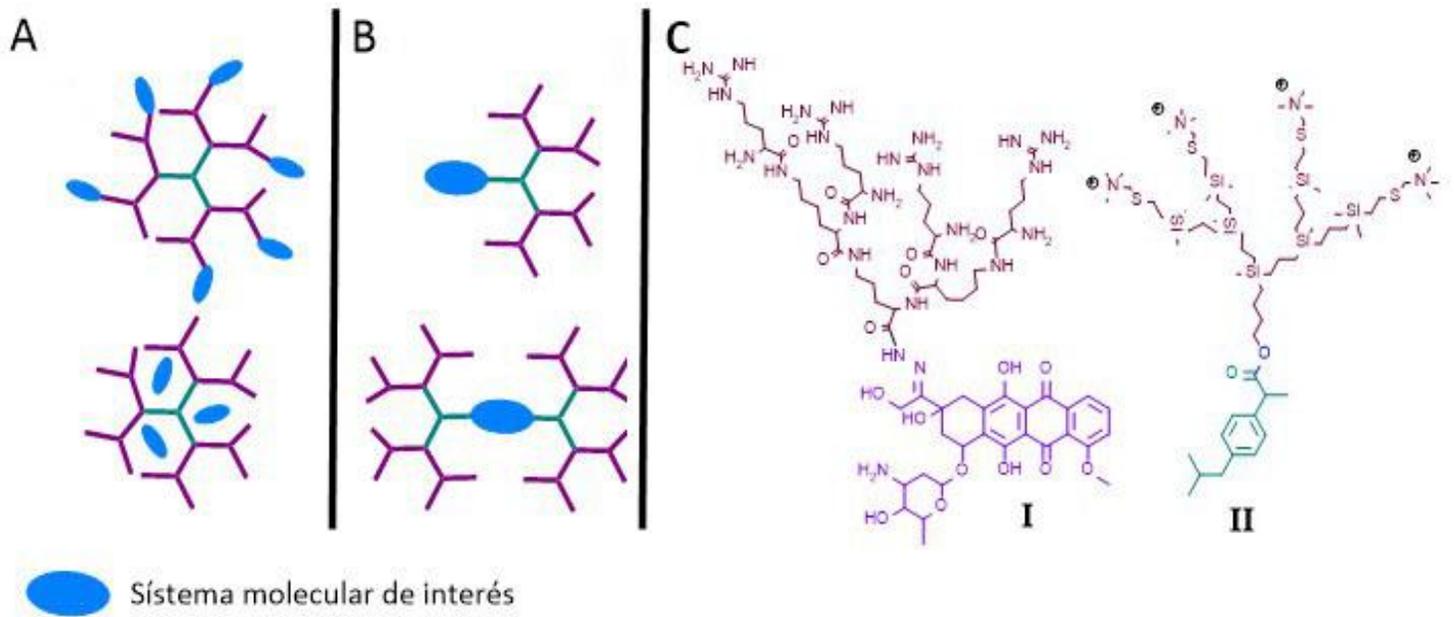


Figura 1. Representación de un dendrímero y sus componentes

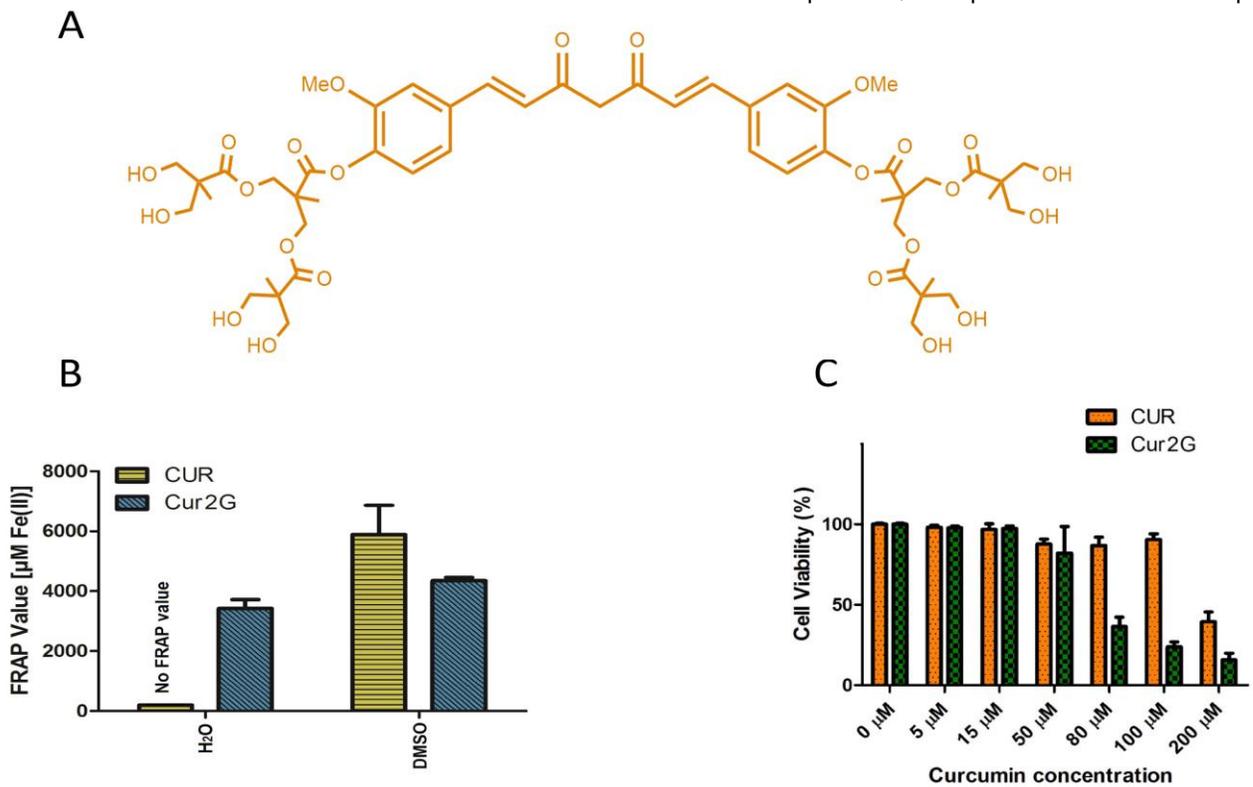
Sin embargo, escalar del laboratorio a la industria estos materiales se ha visto limitado en gran parte por las metodologías de síntesis que involucran múltiples pasos de protección y desprotección, lo cual no es óptimo en términos de economía molecular. En años recientes se ha diseñado una estrategia que consiste en utilizar solo una “rebanada” del dendrímero completo; es decir, un dendrón, para unirlos con otros sistemas moleculares, en diferentes escenarios. Esta estrategia es conocida como dendronización [2], y su principal ventaja es que permite retener la información estructural programada en la arquitectura dendrítica, con un costo sintético significativamente menor.

Las mejoras en las propiedades de un sistema molecular mediante la dendronización han sido exploradas principalmente en sistemas poliméricos [3]. No obstante, esta estrategia ha pasado relativamente desapercibida cuando se aplica a moléculas pequeñas (<600 Da) biológicamente activas o a sistemas moleculares utilizados como contenedores.

Nuestro grupo de trabajo recientemente realizó una revisión de la dendronización de este tipo de sistemas, dando cuenta de cómo esta estrategia permite mejorar propiedades fisicoquímicas relacionadas con su desempeño terapéutico en sistemas biológicos [4]. Considerando el potencial que tiene la dendronización, a continuación, se presentan casos de éxito de su aplicación, incluidos los casos que se han estudiado en nuestro grupo de investigación.



**Figura 2.** Escenarios de dendrímeros como acarreadores de fármacos. **A.** Tradicionales, **B.** Dendronización, **C.** Ejemplos de fármacos dendronizados. **I.** Doxorubicina con dendrón de poliamida, **II.** Ibuprofeno con dendrones de polisilano

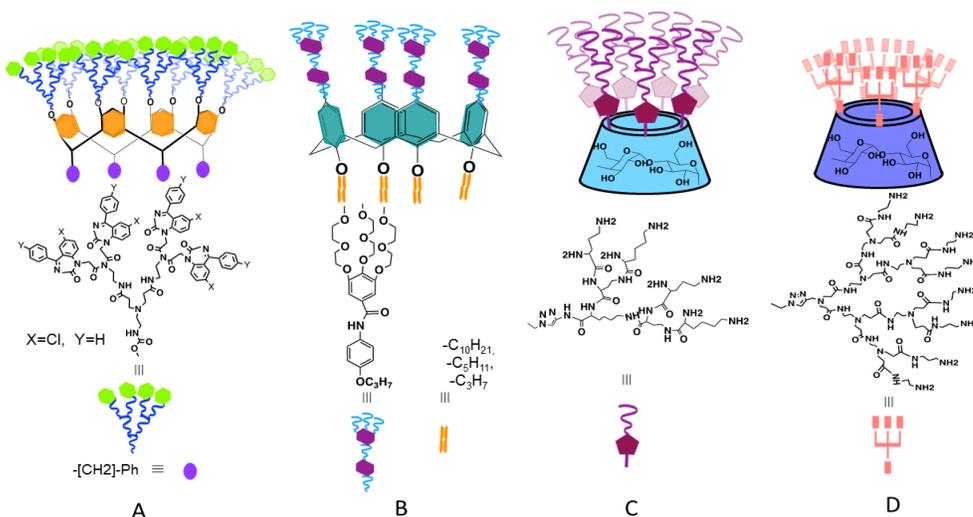


**Figura 3. A.** Curcumina dendronizada (CUR2G), **B.** Ensayo de FRAP (Ferric Reducing Ability of Plasma) para medir el poder antioxidante y, **C.** Prueba de viabilidad celular en células C6 de CUR2G y curcumina

## Dendronización de moléculas biológicamente activas

A diferencia de los escenarios tradicionales, en los que el fármaco es enlazado en la periferia o encapsulado en las cavidades internas de un dendrímero (véase la figura 2A), la dendronización consiste en conjugar el fármaco en el punto focal del dendrón (Fig. 2B). Aplicando esta estrategia se ha logrado mejorar, tanto la solubilidad acuosa como la permeabilidad a través de membranas biológicas, como fue el caso de la doxorubicina (I Fig. 2C) y el ibuprofeno (II Fig. 2C), los cuales fueron derivatizados con dendrones de poliamida y polisilano, respectivamente.

En nuestro grupo de trabajo se ha llevado a cabo la dendronización de la molécula de curcumina,[5] una molécula con un elevado potencial terapéutico en diversos padecimientos. La dendronización se realizó con dendrones de poliéster de segunda generación, cuya síntesis resulta económica y escalable (además se caracterizan por ser biodegradables en condiciones fisiológicas) [6]. El sistema obtenido (CUR2G), mostrado en la figura 3A, presentó una solubilidad acuosa muy superior a la curcumina, sin perder su actividad antioxidante (Fig. 3B). En ensayos de internalización celular, se observó que la presencia de los dendrones modifica el mecanismo de entrada de la curcumina a la célula. Su actividad fue probada en células de glioblastoma de rata (C6) en donde mostró mayor actividad que la curcumina, en cierto rango de concentraciones (Fig. 3C). Este impacto en las propiedades de CUR2G por medio de la dendronización manifiesta el potencial de esta estrategia para obtener nuevos compuestos con un desempeño superior en sistemas biológicos. Sin duda, la dendronización de moléculas biológicamente activas representa una vía para expandir las librerías de moléculas con potencial actividad terapéutica.



**Figura 4. A.** Resorcinareno dendronizado con PAMAM y benzodiazepinas en la periferia con prop. anticancerígenas [8], **B.** Calix[4]areno dendronizado con 3,4,5-TMEE benzamida en el borde superior y cadenas alquílicas en el borde inferior para el transporte de naproxeno e ibuprofeno [9], **C.**  $\beta$ CD dendronizada con PAMAM para transporte de óxido nítrico [10], **D.**  $\beta$ CD dendronizada con poli-L-lisina para el transporte de metotrexato [11]

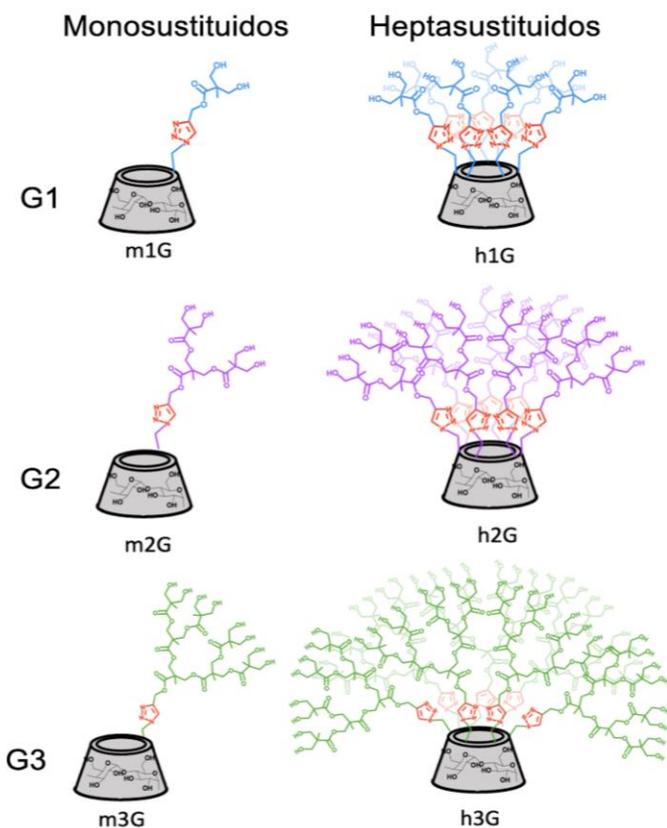
## Dendronización de sistemas acarreadores

Existen numerosos reportes sobre el potencial de diversos sistemas moleculares para ser usados como acarreadores de fármacos, entre los que destacan ciclodextrinas, calixarenos, o resorcinarenos, por mencionar algunos. Sin embargo, las características fisicoquímicas de estos contenedores moleculares asociadas con su potencial aplicación pueden llegar a limitar su uso. Por esta razón, la dendronización de sistemas acarreadores se ha convertido en una estrategia altamente conveniente para superar tales impedimentos [7].

En la Fig. 4, se muestran algunos de los sistemas dendronizados reportados para el transporte de distintos fármacos, donde la incorporación de la arquitectura dendrítica permitió alcanzar en todos los casos, mejor solubilidad acuosa y mayor capacidad de carga de fármaco, potencializando su desempeño como acarreadores [8–11]. Además, la presencia de ciertos grupos funcionales en la periferia de estos sistemas genera un escenario con múltiples sitios de reconocimiento para interactuar con sistemas biológicos. Por ejemplo, la presencia de benzodiazepinas en la periferia del sistema de resorcinareno con dendrones de tipo poliamidoamina (PAMAM) (Fig. 4A), potencializó su efecto inhibitor sobre la proliferación de células cancerosas.

De los diferentes sistemas acarreadores, las ciclodextrinas son por mucho las más utilizadas para mejorar la solubilidad acuosa, estabilidad y propiedades organolépticas de diferentes moléculas bioactivas en formulaciones farmacéuticas. En particular, la dendronización de la  $\beta$ -ciclodextrina ( $\beta$ CD) ha sido la más explorada, y en nuestro grupo de investigación se ha utilizado esta estrategia con el fin de aumentar su solubilidad acuosa para mejorar sus funciones fisicoquímicas y biológicas.

Se llevó a cabo la dendronización de la cara primaria de la  $\beta$ CD con dendrones de poliéster, explorando dos parámetros estructurales: el grado de sustitución (mono- y heptasustitución) y la generación dendrítica ( $G_n$ ), usando la reacción de cicloadición azida-alquino catalizada por cobre, una de las más representativas de la química click, conduciendo a seis nuevos sistemas acarreadores dendronizados [9], los cuales se muestran en la figura 5.

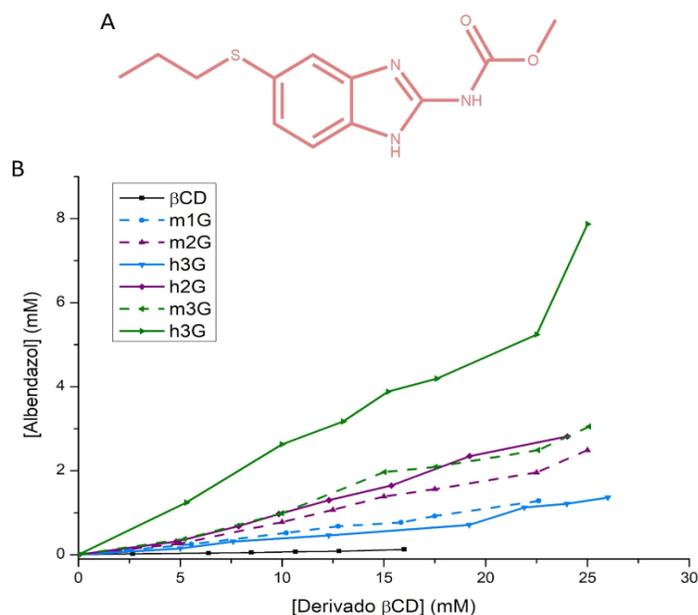


**Figura 5.** Sistemas acarreadores de  $\beta$ CD, mono y heptasustituidos con dendrones de poliéster de primera (G1), segunda (G2) y tercera (G3) generación

Como resultado se logró una mejora sustancial de su solubilidad acuosa, en comparación con la  $\beta$ CD nativa. La capacidad de encapsulamiento de dichos sistemas ha sido probada con dos moléculas hidrofóbicas diferentes, albendazol (Fig. 6A) y curcumina.

En el primer caso se logró un incremento de la solubilidad del albendazol de hasta 900 veces, usando el acarreador h3G. Otro hallazgo interesante fue el hecho de que los sistemas monosustituidos de segunda (m2G) y tercera generación (m3G) tienen una capacidad de encapsulamiento comparable a los sistemas heptasustituidos de primera y segunda generación

(h1G y h2G) (Fig. 6B), por lo que, en términos de economía molecular y esfuerzo sintético, la aplicación de sistemas monosustituidos resulta más eficiente [12].



**Figura 6. A.** Estructura de albendazol, **B.** Concentración de ABZ encapsulado como función de la concentración del sistema acarreador de  $\beta$ CD.

Con respecto a la curcumina, la capacidad de encapsulamiento de los tres sistemas monosustituidos fue superior en comparación con la  $\beta$ CD nativa. De acuerdo con estudios espectroscópicos por UV-vis, se determinó que, dependiendo de la generación dendrítica, es posible modular el equilibrio tautomérico de la curcumina. En especial, el sistema m2G favorece selectivamente la presencia del tautómero diceto (Fig. 7), el cual presenta una mayor actividad antioxidante, mientras que, los sistemas m1G y m3G, conducen a la presencia de una mezcla tautomérica (diceto-enol) [13].

### Puntos destacados

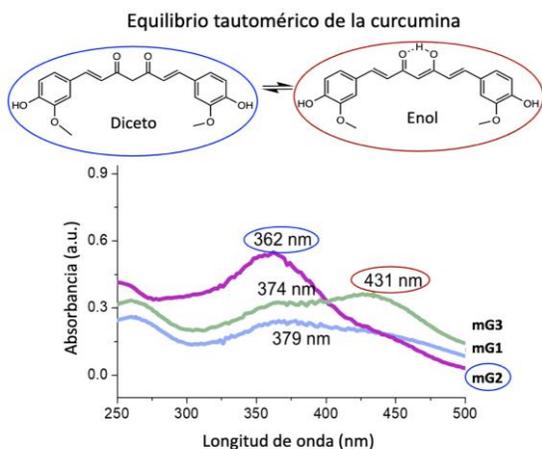
- La dendronización es una estrategia que permite retener información estructural dendrítica en los sistemas resultantes a un costo sintético relativamente menor.
- El impacto en las propiedades de moléculas bioactivas/fármacos mediante la dendronización permite obtener nuevos compuestos con un desempeño terapéutico superior.
- La dendronización de la  $\beta$ CD o de la curcumina con dendrones de poliéster permitió mejorar la solubilidad acuosa de estos compuestos.

## Conclusiones

Los casos aquí mostrados ponen en evidencia que la dendronización es una estrategia para mejorar propiedades tales como la solubilidad, permeabilidad, estabilidad y la actividad terapéutica, tanto de moléculas bioactivas como de sistemas acarreadores.

En particular, la dendronización con dendrones de tipo poliéster, tanto de la molécula de curcumina como de la  $\beta$ CD, permitió mejorar la solubilidad acuosa de ambas, además de modular otras propiedades fisicoquímicas relacionadas con su actividad terapéutica. En lo que respecta a curcumina dendronizada, se determinó que la presencia de la arquitectura dendrítica no limita su capacidad antioxidante. Su actividad terapéutica fue probada en células de glioblastoma, y se determinó que, a mayor concentración, mayor es su actividad, en comparación con la curcumina. En el caso de la  $\beta$ CD dendronizada, se corroboró que la capacidad de encapsulamiento es superior a la  $\beta$ CD nativa. En el caso de albendazol se logró incrementar su solubilidad hasta 900 veces mientras que con la curcumina se observó además la modulación de su equilibrio tautomérico dependiendo de la generación dendrítica, específicamente con dendrón de G2 se favorece la presencia del tautómero diceto, conocido por su actividad antioxidante.

En resumen, la dendronización es una herramienta útil en el diseño de nuevos materiales, resulta ser una estrategia racional que considera el balance entre esfuerzo sintético y economía molecular. Al mismo tiempo permite modular diferentes propiedades fisicoquímicas, dependiendo de la generación y el número de dendrones.



**Figura 7.** Modulación del equilibrio tautomérico de la curcumina en presencia de los acarreadores de  $\beta$ CD monosustituidos con dendrones de poliéster G1, G2 y G3

## Referencias

- [1] C.C. Lee, J.A. MacKay, J.M.J. Fréchet, F.C. Szoka, Designing dendrimers for biological applications., *Nat. Biotechnol.* 23 (2005) 1517–26. <https://doi.org/10.1038/nbt1171>.
- [2] J.I. Paez, M. Martinelli, V. Brunetti, M.C. Strumia, Dendronization: A useful synthetic strategy to prepare multifunctional materials, *Polymers (Basel)*. (2012). <https://doi.org/10.3390/polym4010355>.
- [3] X. Liu, W. Lin, D. Astruc, H. Gu, Syntheses and applications of dendronized polymers, *Prog. Polym. Sci.* 96 (2019) 43–105. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.06.002>.
- [4] C. Cruz-Hernández, L.J. López-Méndez, P. Guadarrama, Dendronization: A practical strategy to improve the performance of molecular systems used in biomedical applications, *Eur. J. Med. Chem.* 229 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2021.113988>.
- [5] J.M. Landeros, F. Belmont-Bernal, A.T. Pérez-González, M.I. Pérez-Pradón, P. Guevara-Salazar, I.G. González-Herrera, P. Guadarrama, A two-step synthetic strategy to obtain a water-soluble derivative of curcumin with improved antioxidant capacity and in vitro cytotoxicity in C6 glioma cells, *Mater. Sci. Eng. C* 71 (2017) 351–362. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.10.015>.
- [6] N. Feliu, M. V. Walter, M.I. Montañez, A. Kunzmann, A. Hult, A. Nyström, M. Malkoch, B. Fadeel, Stability and biocompatibility of a library of polyester dendrimers in comparison to polyamidoamine dendrimers., *Biomaterials*. 33 (2012) 1970–81. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.11.054>.
- [7] J. Movellan, P. Urbán, E. Moles, J.M. de la Fuente, T. Sierra, J.L. Serrano, X. Fernández-Busquets, Amphiphilic dendritic derivatives as nanocarriers for the targeted delivery of antimalarial drugs, *Biomaterials*. 35 (2014) 7940–7950. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2014.05.061>.
- [8] S. Cortez-Maya, S. Hernández-Ortega, T. Ramírez-Apan, I. V. Lijanova, M. Martínez-García, Synthesis of 5-aryl-1,4-benzodiazepine derivatives attached in resorcinaren-PAMAM dendrimers and their anti-cancer activity, *Bioorganic Med. Chem.* 20 (2012) 415–421. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2011.10.070>.
- [9] K. Khan, S. Lal Badshah, N. Ahmad, H.U. Rashid, Y. Mabkhot, Inclusion complexes of a new family of non-ionic amphiphilic dendrocalix[4]arene and poorly water-soluble drugs naproxen and ibuprofen, *Molecules*. 22 (2017). <https://doi.org/10.3390/molecules22050783>.
- [10] T. Liu, G. Li, X. Wu, S. Chen, S. Zhang, H. Han, H. Zhang, X. Luo, X. Cai, D. Ma, B-Cyclodextrin-graft-poly(amidoamine) dendrons as the nitric oxide deliver system for the chronic rhinosinusitis therapy, *Drug Deliv.* 28 (2021). <https://doi.org/10.1080/10717544.2021.1876183>.
- [11] D. Ma, H. Bin Zhang, Y.Y. Chen, J.T. Lin, L.M. Zhang, New cyclodextrin derivative containing poly(L-lysine) dendrons for gene and drug co-delivery, *J. Colloid Interface Sci.* 405 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.05.017>.
- [12] L.J. López-Méndez, E.E. Cuéllar-Ramírez, N.C. Cabrera-Quiñones, Y. Rojas-Aguirre, P. Guadarrama, Convergent click synthesis of macromolecular dendritic  $\beta$ -cyclodextrin derivatives as non-conventional drug carriers: Albendazole as guest model, *Int. J. Biol. Macromol.* 164 (2020) 1704–1714. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.018>.
- [13] N.C. Cabrera-Quiñones, L.J. López-Méndez, E. Ramos, Y. Rojas-Aguirre, P. Guadarrama, Mono-Dendronized  $\beta$ -Cyclodextrin Derivatives as Multitasking Containers for Curcumin. Impacting Its Solubility, Loading, and Tautomeric Form, *J. Phys. Chem. B*. 126 (2022) 1529–1538. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c09811>.



# El enlace de halógeno

Luis David Rosales Vázquez,  
Alejandro Dorazco González

Instituto de Química, UNAM  
Av. Universidad 3000, Circuito Exterior S/N  
Delegación Coyoacán, C.P. 04510  
Ciudad Universitaria, CDMX, México

[id\\_222@comunidad.unam.mx](mailto:id_222@comunidad.unam.mx)  
[adg@unam.mx](mailto:adg@unam.mx)

## El enlace de halógeno

El enlace de halógeno es una interacción reversible no covalente que ocurre entre la región positiva de un átomo de halógeno (agujero-sigma) y una base de Lewis. Esta interacción muestra distancias interatómicas entre la base de Lewis y el átomo de halógeno ( $X \cdots B$ ) menores a la suma de sus respectivos radios de Van der Waals (figura 1). Adicionalmente, el ángulo ( $\angle R-X \cdots B$ ) es cercano a  $180^\circ$  entre el átomo aceptor (base de Lewis), el átomo donador (halógeno) y el grupo R unido directamente al átomo de halógeno. La fuerza de esta interacción está relacionada con el ángulo: a mayor linealidad, más fuerte es la interacción [1, 2].

Las principales estrategias estructurales utilizadas para formar este tipo de interacciones están basadas en el uso de halógenos pesados. Entre todos ellos, los átomos de I y de Br son los más eficientes para la formación del enlace de halógeno. En contraste, los átomos de Cl son bastante escasos y aún más raros los átomos de F (figura 2a). Otra estrategia incorpora grupos con alta demanda electrónica (también denominados, grupos *electroattractores* o *desactivantes*, figura 2b) al diseño de sus moléculas, o grupos cuya estructura conlleve la posibilidad de obtener una molécula catiónica, como por ejemplo grupos de imidazolidonio, triazolonio y piridinio (figura 2c).

El átomo directamente enlazado al átomo de halógeno también juega un rol importante, ya que según sea su hibridación en el enlace, éste presentará una menor o mayor acidez que influirá en el carácter positivo resultante (figura 2d) [1, 2].

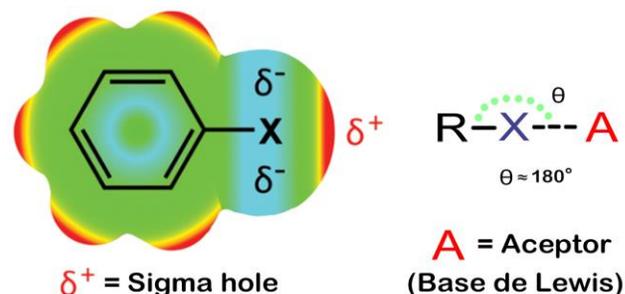
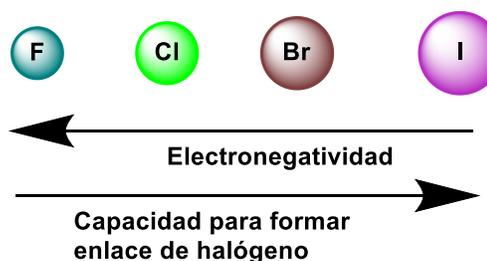
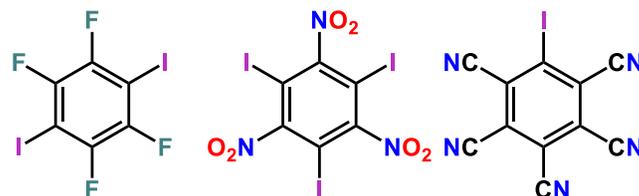


Figura 1. Fundamentos del enlace de halógeno

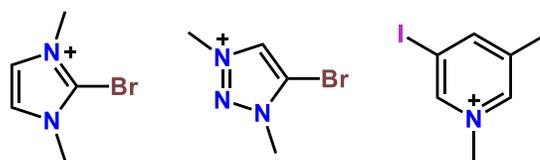
## a) Elección del halógeno



## b) Grupos electroattractores



## c) Moléculas catiónicas



## d) Hibridación

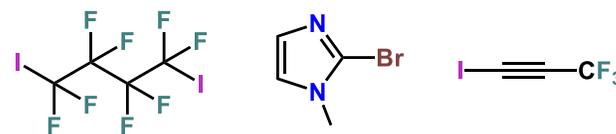


Figura 2. Estrategias utilizadas para su diseño

La fuerza del enlace está directamente relacionada con el porcentaje del orbital “s” en la interacción. Entre mayor sea este carácter “s”, la estabilidad de la interacción incrementará ( $sp > sp^2 > sp^3$ ) [1, 2].

**Interesantemente, las estrategias utilizadas para formar la interacción están basadas en el incremento del carácter positivo de estos átomos altamente electronegativos**

El correcto uso de las cuatro estrategias conlleva a la formación del enlace de halógeno, el cual posee direccionalidad y un carácter hidrofóbico. La direccionalidad ha permitido la síntesis dirigida de redes mediante cocrisales orgánicos, polímeros, copolímeros y polímeros de coordinación. En la figura 3 se muestra la formación de cocrisales dirigidos por los enlaces de halógeno entre N-yodosuccinimida y hexametilentetramina. Una aplicación del enlace de halógeno dirigido es la mejora de semiconductores orgánicos [3].

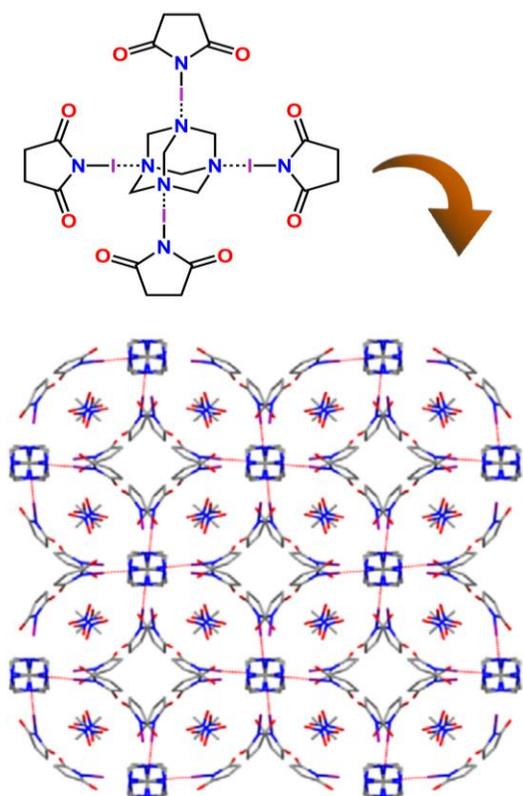
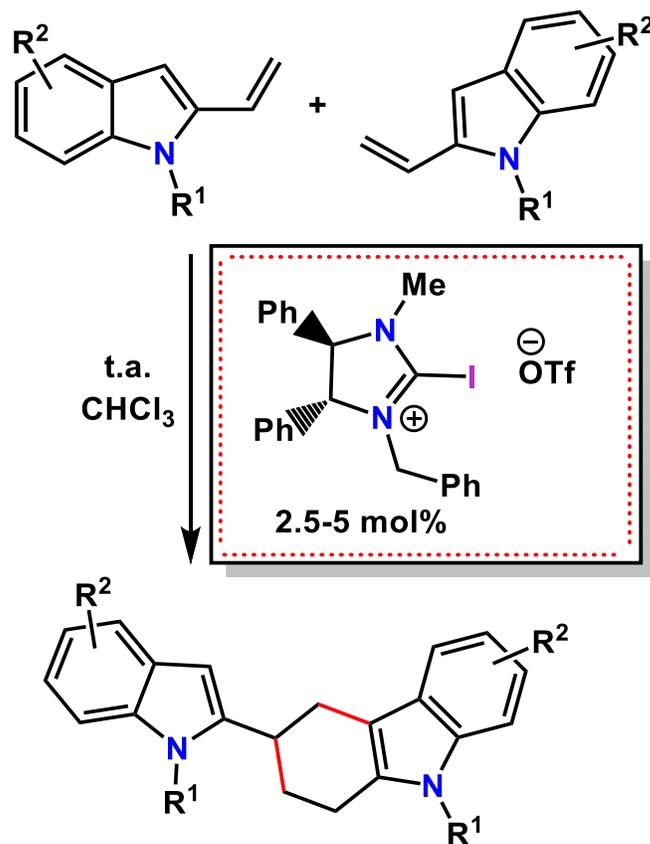


Figura 3. Arreglo supramolecular del cocrystal N-yodosuccinimida y hexametilentetramina

En el campo de los catalizadores, el uso de los enlaces de halógeno ha mejorado la eficiencia de reacciones orgánicas clásicas como la de Friedel-Crafts, Diels-Alder, la adición de Michael, Mannich, así como reacciones de tipo fotoquímicas, radicalarias, transposiciones tipo pinacólicas, reducción de quinolinas, de acoplamiento carbono-carbono y cicloadiciones [4+2], tal como se muestra en la figura 4 [4].



t.a. = temperatura ambiente  
 Ph = Fenilo  
 Me = Metilo  
 OTf = anión triflato

Figura 4. Reacción de cicloadición [4+2] entre alquenilindoles catalizada por enlace de halógeno

**El enlace de halógeno fue una pieza clave para el incremento substancial de la especificidad y el aumento en la potencia antiviral del fármaco para el tratamiento contra la Hepatitis C**

El papel de los enlaces de halógeno en los sistemas biológicos es un área muy activa y de constante crecimiento dentro de la química supramolecular y bioquímica. Este enlace se localiza, principalmente, en sistemas proteína-ligante y está relacionado con la especificidad y afinidad de la proteína al sustrato [5]. Ejemplos selectos de estos sistemas pueden verse en la figura 5 y en la tabla 1. La estructura cristalográfica de las proteínas puede consultarse en la base de datos de proteínas: <https://www.rcsb.org/>

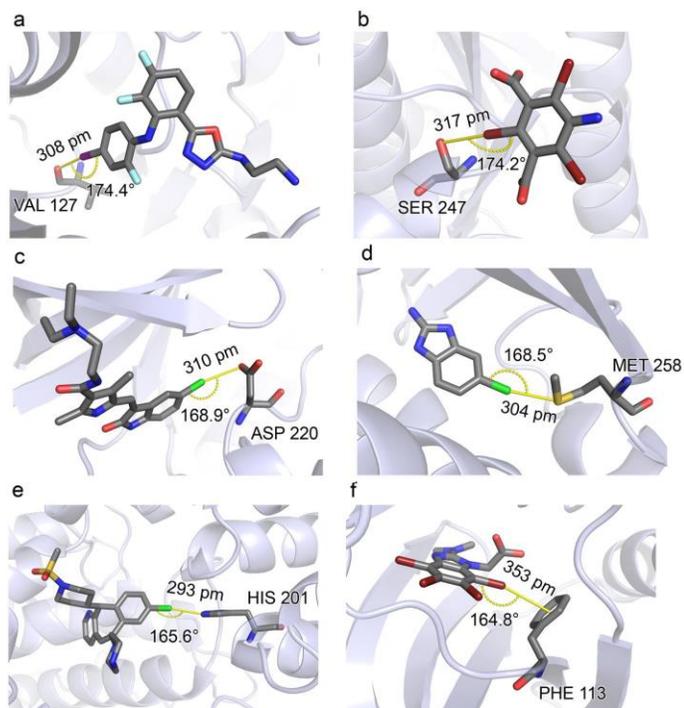


Figura 5. Ejemplos relevantes de la interacción en sistemas biológicos

Tabla 1. Sitios de interacción del enlace de halógeno en proteínas

Proteína	Interacción	Base de Lewis
3EQB	I - - - O	Valina 127
3GT3	Br - - - O	Serina 247
3HZZ	Cl - - - O	Ácido aspártico 220
3KRI	Cl - - - S	Metionina 258
2BED	Cl - - - N	Histidina 258
2KXH	Br - - - π	Fenilalanina 113

Es en este contexto que múltiples equipos de investigación alrededor del mundo han enfocado su atención en el estudio detallado del enlace de halógeno, así como su aplicación en

diversos fármacos. Tal es el caso de la molécula **BI 201335** que actúa como un inhibidor de la Proteasa NS3, a través de la interacción Br --- O del grupo carboxilato correspondiente al Aspartato 79 ubicado justo en el sitio activo de la enzima, Figuras 6 y 7. Lemke *et. al.* determinaron que el enlace de halógeno fue una pieza clave para el incremento substancial de la especificidad y el aumento en la potencia antiviral del fármaco para el tratamiento contra la Hepatitis C [6].

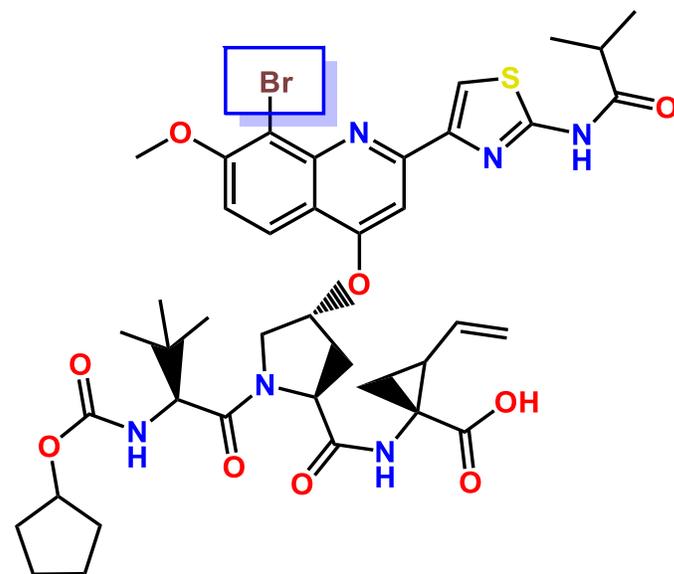


Figura 6. BI 201335

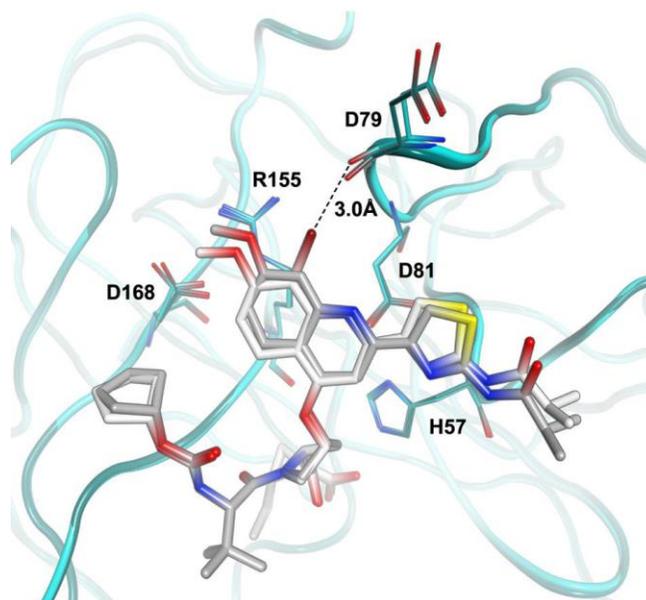


Figura 7. Inhibición del sitio activo del Proteasa NS3 por el fármaco BI 201335 a través del enlace de halógeno Br --- O

## Conclusiones

El futuro y las oportunidades que presentan el enlace de halógeno son bastante prometedoras dentro del campo de la Ciencia de materiales y de la catálisis. A diferencia del enlace de hidrógeno, el enlace de halógeno es una herramienta relativamente nueva dentro de la química supramolecular, y es por esto mismo que aún falta mucho por descubrir. Queda como tarea pendiente para los investigadores comprometidos aprovechar al máximo las cualidades de esta interacción y comprender, sobre todo, las características aplicadas en su construcción, con la mirada puesta en sus diversas aplicaciones.

## Referencias

1. Cavallo, G. *et al.* The halogen bond. *Chem. Rev.* **116**, 2478–2601 (2016).
2. Gilday, L. C. *et al.* Halogen Bonding in Supramolecular Chemistry. *Chem. Rev.* **115**, 7118–7195 (2015).
3. Berger, G., Frangville, P. & Meyer, F. Halogen bonding for molecular recognition: new developments in materials and biological sciences. *Chem. Commun.* **56**, 4970–4981 (2020).
4. Sutar, R. L. & Huber, S. M. Catalysis of Organic Reactions through Halogen Bonding. *ACS Catal.* **9**, 9622–9639 (2019).
5. Wilcken, R., Zimmermann, M. O., Lange, A., Joerger, A. C. & Boeckler, F. M. Principles and applications of halogen bonding in medicinal chemistry and chemical biology. *J. Med. Chem.* **56**, 1363–1388 (2013).
6. Lemke, C. T. *et al.* Combined x-ray, NMR, and kinetic analyses reveal uncommon binding characteristics of the hepatitis C virus NS3-NS4A protease inhibitor BI 201335. *J. Biol. Chem.* **286**, 11434–11443 (2011).

# Endurecimiento en aleaciones de aluminio, ciclo de vida de precipitados

Sarahi Cataño Torres, Carlos Gamaliel Garay Reyes,  
Roberto Martínez Sánchez

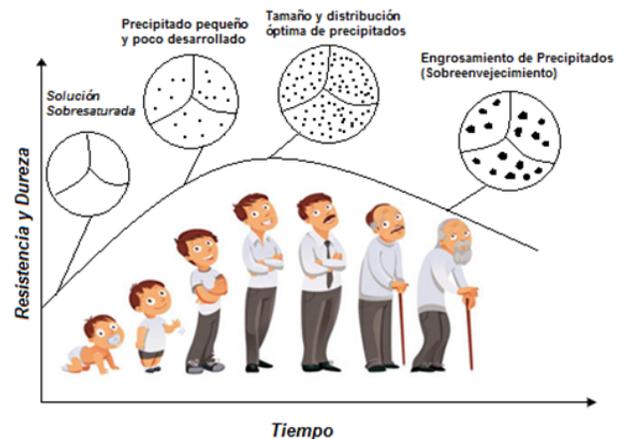
Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV),  
Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Miguel de  
Cervantes 120, 31136 Chihuahua, Chih., México

[sarahi.catanoto@gmail.com](mailto:sarahi.catanoto@gmail.com),  
[carlos.garay@cimav.edu.mx](mailto:carlos.garay@cimav.edu.mx),  
[roberto.martinez@cimav.edu.mx](mailto:roberto.martinez@cimav.edu.mx)

La industria aeroespacial y automotriz exige a las empresas manufactureras un alto control en la fabricación de productos y componentes como, por ejemplo, en la producción de motores y rines de automóviles; fuselaje y alas de aviones; ventanas, por mencionar algunos. Debido a que las propiedades mecánicas presentan una relación directa con la microestructura, es necesario conocer y entender la microestructura que se obtiene en las diferentes etapas de producción, además de los tratamientos térmicos empleados y las propiedades mecánicas resultantes, ya que esto asegurará la calidad de los productos fabricados.

Para la fabricación de componentes a base de aleaciones de aluminio, este elemento es aleado con algunos otros elementos, como por ejemplo cobre, silicio, magnesio o zinc, principalmente. Algunos procesos posteriores y tratamientos térmicos que tienen la finalidad de incrementar las propiedades mecánicas del material son generalmente requeridos. Estos procesos y tratamientos comprenden una amplia variedad de mecanismos de endurecimiento que provocan cambios en la microestructura del material. Los principales

mecanismos de endurecimiento son: disminución de tamaño de grano, adición de partículas reforzantes de tamaño nanométrico ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ), endurecimiento por deformación, endurecimiento por solución sólida y endurecimiento por precipitación. Siendo uno de los más usados, el llamado endurecimiento por precipitación (o también conocido como tratamiento térmico de envejecido), el cual es una de las formas más efectivas en el desarrollo de aleaciones de alta resistencia. Por lo que, desde el punto de vista educativo, es importante conocerlo y comprenderlo para entender los materiales. El nombre se debe a que, durante el desarrollo de este proceso, las propiedades mecánicas van mejorando en función del tiempo hasta llegar a un máximo antes de empezar un decremento, asemejando al ciclo de vida de los seres humanos (ver Fig. 1).



**Figura 1.** Curva de resistencia y dureza de una aleación tratada térmicamente mediante el tratamiento térmico de precipitación y curva del ciclo de vida del ser humano

El tratamiento térmico de envejecido se lleva a cabo en tres etapas (ver figura 2). La primera es conocida como tratamiento térmico de solución (solubilizado). En esta etapa el material es calentado a una temperatura por encima de la línea *solvus* durante un tiempo suficiente para formar una solución sólida. Una vez que se obtiene la solución sólida se realiza el temple, segunda etapa, el cual es un proceso que consiste en enfriar drásticamente el material hasta temperatura ambiente.

La microestructura obtenida después del temple constará de una solución sólida sobresaturada (SSS), es decir, una solución sólida con exceso del elemento de aleación. La tercera etapa involucra la descomposición de la SSS para formar precipitados finamente dispersos, los cuales serán responsables del endurecimiento de la aleación, de ahí el nombre, endurecimiento por precipitación. Dicha formación de

precipitados se puede realizar a temperatura ambiente (envejecimiento natural) o a una temperatura relativamente elevada (envejecimiento artificial). El más común es el envejecido artificial, que se lleva a cabo usualmente a temperaturas de entre el 15 % y el 25 % de la diferencia de temperaturas entre la temperatura ambiente y la temperatura de solubilizado [1].

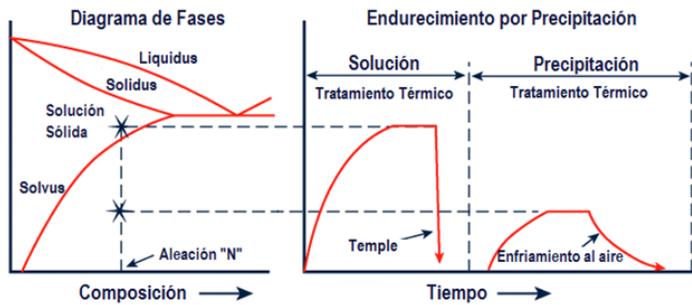


Figura 2. Esquema del tratamiento térmico de precipitación

Así, el objetivo del endurecimiento por precipitación es generar una microestructura compuesta de una dispersión densa y fina de precipitados en la matriz metálica (ver figura 3, adaptado de referencia [2]). Estos precipitados actuarán como barreras para el libre deslizamiento de las dislocaciones, forzándolas a pasar a través de los precipitados, ya sea rodeándolos o cortándolos, lo cual se refleja en un aumento de resistencia y otras propiedades mecánicas de la aleación [1].

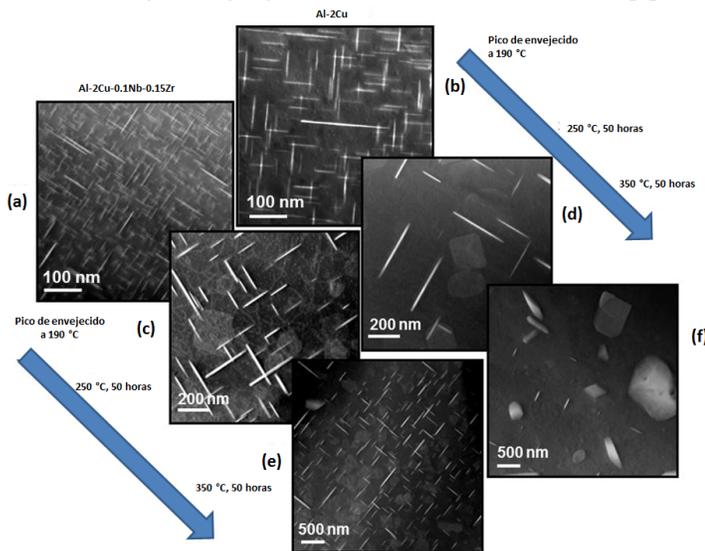


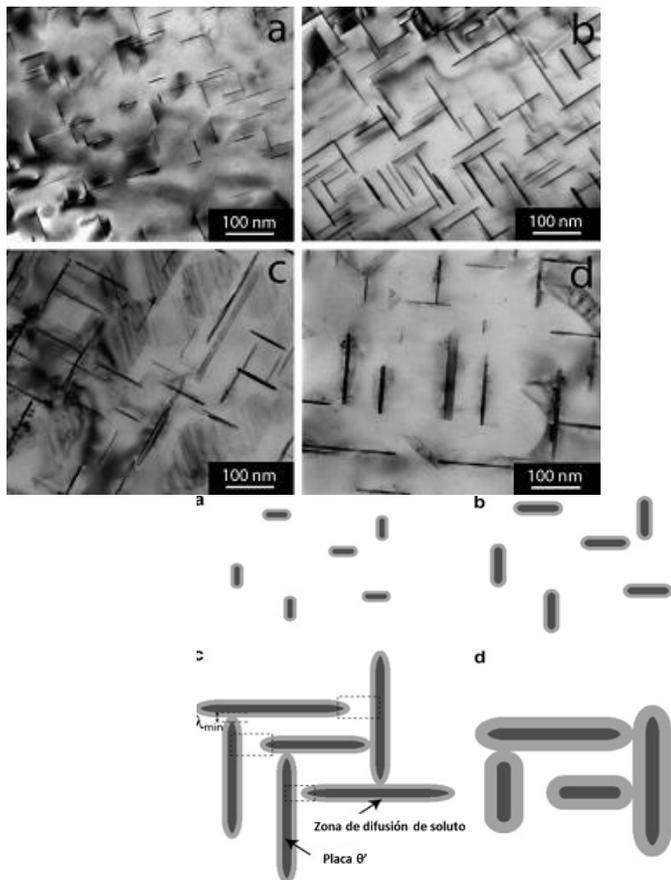
Figura 3. Precipitados formados en aleaciones Al-2Cu-0.1Nb-0.15Zr y Al-2Cu. Aleación Al-2Cu-0.1Nb-0.15Zr después de (a) envejecido a 190 °C durante 5 horas, (c) 50 horas de exposición a 250 °C y (e) 50 horas de exposición a 300 °C Aleación Al-2Cu después de (b) envejecido a 190 °C durante 10 horas, (d) 50 horas de exposición a 250 °C y (f) 50 horas de exposición a 300 °C. Adaptado de referencia [2]

Por razones de orden termodinámico y cinético, la SSS obtenida después de los tratamientos de solución y temple no da lugar a la precipitación de la fase de equilibrio a temperatura ambiente. El endurecimiento de las aleaciones de aluminio a temperatura ambiente o por envejecimiento artificial resulta de una descomposición secuencial de la SSS y de un empobrecimiento progresivo de soluto de esta última. Así, la resistencia del material aumenta debido a una alta densidad de finos precipitados coherentes o semicoherentes. De tal modo que el control de la precipitación durante el envejecimiento artificial es crítico para obtener propiedades mecánicas óptimas de las aleaciones. Una secuencia de precipitación generalmente aceptada, y que sirve para ejemplificar la secuencia de precipitación, es la del sistema Al-Mg-Si y la precipitación de la fase  $\beta$ . La cual sigue las etapas que a continuación se mencionan: solución sólida sobresaturada (SSS)  $\rightarrow$  Zonas G.P.  $\rightarrow$  Precipitados metaestables  $\beta''$   $\rightarrow$  Precipitados metaestables  $\beta'$   $\rightarrow$  Precipitados estables  $\beta$ . Las zonas GP son precipitados con un tamaño de varios nanómetros, generalmente formados durante el envejecimiento natural (o los primeros minutos del proceso de envejecimiento artificial). Las fases  $\beta''$  y  $\beta'$  se forman en el proceso de envejecimiento artificial antes del sobre-envejecido y  $\beta$  es la fase estable final. Si bien la secuencia presentada no es válida exactamente para todos los sistemas, se presenta como una guía general.

Mediante el tratamiento de envejecido en un tiempo dado se obtiene un aumento en las propiedades mecánicas, como la dureza y la resistencia, así como un decremento en la ductilidad. Cuando el tiempo de envejecido sobrepasa el óptimo ocurre un engrosamiento de precipitados, también llamado sobre-envejecido, el cual consiste principalmente en la disminución de la densidad numérica de los precipitados. Con el engrosamiento se aprecia una disminución en las propiedades antes mencionadas, ya que disminuye la cantidad de obstáculos para el libre deslizamiento de las dislocaciones (ver figura 4, adaptado de referencia [3]).

Para comprender de una mejor manera la curva de propiedades mecánicas obtenidas por endurecimiento por precipitación o endurecimiento por envejecido se puede hacer la comparación con la curva de vida de los seres humanos. Cuando una persona es pequeña es muy débil físicamente. Conforme pasa el tiempo, esta persona va creciendo y sus aptitudes físicas y mentales van mejorando hasta llegar a una plenitud, a partir de ahí empieza un decremento en las capacidades físicas y mentales (ver figura 1). Las aleaciones endurecibles por envejecido o por precipitación presentan un

incremento en sus propiedades mecánicas conforme pasa el tiempo del tratamiento hasta llegar a un máximo, seguido de la etapa del sobre-envejecido donde ocurre el inicio del decremento en sus propiedades mecánicas. Así, la comparación de este mecanismo de endurecimiento con el desarrollo humano nos permite comprender la importancia del procesamiento de las aleaciones endurecibles por envejecido y generar un mejor entendimiento, partiendo del hecho que este tipo de aleaciones que podemos encontrar en los vehículos y en los hogares son de suma importancia en nuestra vida cotidiana.



**Figura 4.** Arriba: micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de transmisión de precipitados  $\theta$  en una aleación Al – 3Cu – 0.05Sn (% en peso) envejecida a 200 °C. (a) 30 min, (b) 4 h (máximo de dureza), (c) 5 días y (d) 30 días. Abajo: representación esquemática del crecimiento y engrosamiento de precipitados. (a) Nucleación y crecimiento de los precipitados; (b) crecimiento del precipitado; (c) choque de placas adyacentes (rectángulos punteados). Las regiones blancas representan la matriz supersaturada no transformada. (d) Engrosamiento durante el cual se observa una disminución en la densidad numérica. Adap. Ref. [3]

## Referencias

- [1] Ciencia e Ingeniería de Materiales. Aleaciones de Ingeniería. 3ra Edición. William F. Smith.
- [2] Surendra Kumar Makineni, Sandeep Sugathan, Subhashish Meher, Rajarshi Banerjee, Saswata Bhattacharya, Subodh Kumar & Kamanio Chattopadhyay (2017). Enhancing elevated temperature strength of copper containing aluminium alloys by forming  $L1_2$  AlZr precipitates and nucleating  $\theta''$  precipitates on them. Scientific Reports, 7:11154.
- [3] Da Costa Teixeira, J., Cram, D.G., Bourgeois, L., Bastow, T.J., Hill, A.J. and Hutchinson, C.R. (2008), On the strengthening response of aluminum alloys containing shear resistant, plate-shaped precipitates, Acta Materialia, 56: 6109.



# La educación formal: entre la desigualdad educativa y la brecha digital en tiempos de post pandemia. Ecuación difícil de resolver

Jorge Alfredo Blanco Sánchez

División de Investigación y Postgrado,  
Universidad Virtual del Estado de Guanajuato  
Purísima del Rincón, Guanajuato, 36400, México

[joblanco@uveg.edu.mx](mailto:joblanco@uveg.edu.mx)

A principios de la pandemia se pensaba que las restricciones para evitar los contagios y propagación del COVID 19 iban a ser suficientes y que el regreso a clases se daría en cuestión de algunas semanas. La realidad nos mostró que estábamos muy equivocados. Hoy en día parece ser que estamos *saliendo del túnel*, pero no podemos olvidar que la subida de contagios y de muertes ha sido un vaivén de escaladas y precipitaciones de más de dos años de duración.

Dentro de este panorama, vivido y sufrido, nos encontramos con que la educación en México no encuentra un punto de equilibrio (y menos de estabilidad). En otras palabras, *estamos en crisis*. Los padres de familia y los alumnos en un principio tomaron la falta de clases presenciales como un descanso, vacaciones, un respiro al ciclo escolar. Sin embargo, el tiempo ha transcurrido y todavía no existe un programa formal, dado a conocer por las autoridades competentes, de cómo se restablecerá el proceso educativo. Solo se escuchó que el regreso presencial a clases se daría de manera paulatina, dependiendo de las condiciones de cada escuela, especialmente en las instituciones públicas. La situación fue clara y dolorosa.

No estábamos preparados para afrontar una situación como esta. Ni las autoridades ni el personal directivo tomaron cartas en el asunto para adecuarse rápidamente a una nueva situación o una emergencia. A los docentes y educadores también los tomó por sorpresa y con poca preparación para moverse a la modalidad digital, la educación virtual y a distancia.

El presente documento tiene la intención de reportar aquellos aspectos que son urgentes de resolver para establecer un regreso a clases, lo más estable posible dentro de las nuevas condiciones socioeconómicas y de sanidad, tratando de reponer el tiempo y el conocimiento perdido. Para ello se establecen tres aspectos por analizar: la desigualdad educativa, la brecha digital y las condiciones que la pandemia ha dejado en el sistema educativo como una nueva realidad de vida.

La desigualdad educativa tiene un muy amplio espectro, por lo que solo se tomarán en cuenta tres aspectos: las estrategias y técnicas de educación para el aprendizaje; la capacitación y manejo (tanto de maestros como de alumnos) de canales de comunicación digitales y a distancia con los que se cuenta en la actualidad para la interacción en el proceso educativo, y la visión de una educación más integral, donde el aprendizaje sea el centro del proceso y el sustento para el desarrollo de la libertad de los educandos, tanto de expresión, de pensamiento y de decisión.

La tarea no es menor, y tampoco el alcance de cada uno de los aspectos antes señalados que nos permiten darnos cuenta de que las desigualdades educativas ya existentes antes de la pandemia son ahora mayores. Difícilmente se podrán acortar si no se cuenta con una planeación educativa estratégica que establezca claramente los objetivos por alcanzar en cada ciclo escolar a partir de un supuesto de **post pandemia** (de aprendizajes perdidos). El nuevo planteamiento requerirá de repensar la educación desde una perspectiva innovadora, creativa y comprometida con la idea de *educar para la vida*. No podemos quedarnos en buenos deseos e intenciones, tenemos que ponernos a pensar, trabajar y tomar decisiones que reviertan este alargamiento de desigualdad y equidad entre los alumnos y sus oportunidades de movilización social. El modelo educativo actual ya no se encuentra acorde con la realidad vigente y el futuro inmediato de la vida virtual laboral. En otras palabras, las desigualdades educativas se perciben como problemas de forma y fondo, desde su planteamiento hasta su ejecución. No hay marcha atrás, tenemos que tomar decisiones valientes y de visión progresista para una educación inclusiva y participativa.

Por otro lado, ¿cómo vamos a acelerar el proceso de capacitación de los profesores y de los alumnos en el manejo de herramientas tecnológicas (que está comprobado que ayudan a potencializar las habilidades y competencias de los docentes y estudiantes) para transitar de manera transparente e intuitiva al ámbito virtual? Ahora se habla con mucha naturalidad de ambientes virtuales de aprendizaje, de plataformas educativas digitales para referirse a los espacios virtuales donde convergen los alumnos y los profesores. No menos importante es hacer énfasis en que la educación formal debe de moverse hacia el desarrollo del alumno a través de procesos de mejora continua, de aprender a aprender, de educar para la libertad y de madurez intelectual. Deseamos contar con generaciones mejor preparadas en el ámbito de responsabilidad social, pensamiento cooperativo, ciudadano participativo, comprometido con el cuidado del medio ambiente y sus congéneres.

Tal vez es mucho pedir, pero es la gran diferencia entre los que tienen objetivos como institución educativa comprometida y quienes esperan que regrese la antigua normalidad, tanto a la escuela como al ámbito social, para continuar con sus planes de estudio establecidos. La brecha digital está más enfocada a informar sobre los aspectos tecnológicos, desde su implementación y uso hasta su accesibilidad dentro del territorio nacional. Los datos duros son reveladores de que todavía estamos lejos de tener una buena cobertura nacional, tal vez un poco arriba del 50 % (INEGI 2020). Pero es nuestra realidad y sobre ella debemos de construir mejores estrategias para que la mayor cantidad posible de educandos sea beneficiada. El tratar de cerrar la brecha digital no es solo un asunto de carácter económico, también es de políticas públicas, de intereses sociales y obviamente del sector educativo.

El sistema educativo mexicano debe dejar atrás su estado reumático y de casi nula movilidad para volverse más ágil, más dinámico y con una visión más inclusiva y progresista. La Pandemia nos adormeció, nos puso de rodillas y es momento de levantarse para ofrecer un cambio significativo a las nuevas demandas de la sociedad. Fernando Savater, en su libro *El valor de educar*, nos indica que la educación “consiste en fomentar el uso de la razón, esa capacidad de observar, abstraer, deducir, argumentar y concluir como proceso mental de la condición humana” (Savater, 1997: 145). El gran reto es entonces estimular tanto a docentes como al alumnado en que se preparen para ejercitar y hacer valer esta transmisión, producción y construcción del conocimiento útil que les permitirá una educación para la vida, para los individuos y para la humanidad.

## Referencias

Fuentes, M. (2003) Construyendo la calidad. indicadores y criterios de calidad para la educación a distancia. Universidad Autónoma de Yucatán. Recuperado de <http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:1430/n04ley03.pdf>

Gorga, G. Madoz, C. Sanz, C. (2010) *Evaluación de calidad en sistemas de educación a distancia. Propuesta y aplicación a un caso de estudio.*

INEGI Censo de población y vivienda 2020, 2021. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>

Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2020). *Guía Iberoamericana para la evaluación de la calidad de la educación a distancia (OEI)*. Área de Educación Superior, Ciencia y ETP. Bravo Murillo,38 -28015 Madrid, España. Recuperado de <http://riaces.org/guia-iberoamericana-para-la-evaluacion-de-la-calidad-de-la-educacion-a-distancia/>

Savater, Fernando. (1997). *El valor de educar*. Instituto de Estudios Educativos y Sindicales de América. México D.F.

Savater, Fernando. (2000). *Los caminos para la libertad. Ética y Educación*. Cátedra Alfonso Reyes del Tecnológico de Monterrey. Ed. Ariel, México.

XVI Congreso argentino de ciencias de la computación. Instituto de Investigación en Informática. LIDI (III LIDI) Facultad de Informática. Recuperado de [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/19118/Documento\\_completo.pdf?sequence=1](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/19118/Documento_completo.pdf?sequence=1)

# Estudio de un proceso de biolixiviación en un concentrado de hierro desde el punto de vista reológico

Luis Medina-Torres<sup>\*1</sup>, Diola-Marina Nuñez Ramirez<sup>2</sup>,  
Luis Antonio Ramirez-Torres<sup>3</sup>, Fausto Calderas<sup>4</sup>,  
Ma. Josefa Bernad-Bernad<sup>1</sup>, Octavio Manero<sup>3</sup>

<sup>\*1</sup>Facultad de Química, UNAM  
Circuito Exterior S/N, Coyoacán, Cd. Universitaria, 04510,  
Ciudad de México, CDMX

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Químicas, UJED  
Av. Veterinaria s/n. Circuito Universitario, Col. Valle del sur,  
C.P. 34120. Durango, Dgo. México

<sup>3</sup>Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM  
Departamento de Reología y Mecánica de Materiales,  
Circuito Exterior S/N Circuito de la Investigación Científica,  
Cd. Universitaria, 04510, Ciudad de México, CDMX

<sup>4</sup>Facultad de Estudios Superiores de Zaragoza, UNAM  
Campus II Batalla 5 de mayo s/n esquina Fuerte de Loreto,  
Col. Ejército de Oriente, Iztapalapa C.P. 09230, CDMX

\* [luismt@unam.mx](mailto:luismt@unam.mx)

## Introducción

La industria minera se encuentra en la búsqueda de nuevas alternativas o mejoras de los procesos de extracción existentes (gravimetría, amalgamación, flotación, lixiviación, entre otros) para la purificación de concentrados de minerales.

Dentro de las impurezas más comunes que hay que remover en, por ejemplo, los concentrados de hierro, están el silicio, fósforo, zinc, azufre y otros. Además, a nivel mundial los yacimientos minerales con alto contenido de hierro son cada vez más escasos y la purificación de *jales mineros*, es decir, mineral con bajo contenido de hierro (baja pureza) es más común en la industria minera. Por otro lado, la mala disposición de estas minas ha causado daños en el medio ambiente y en la salud humana. Por lo anterior, el tratamiento de *jales* de baja ley, y de concentrados de pulpas de mineral no solo es necesario para disminuir la contaminación que estos puedan generar en el subsuelo, sino también para la recuperación eficiente de los metales. Investigaciones recientes han sugerido que el proceso de biolixiviación de metales es una alternativa eficiente, económica y amigable con el medio ambiente [1, 2].

## Bioteología de minerales y biolixiviación

La biotecnología de minerales ha despertado un gran interés en los procesos bio-hidrometalúrgicos debido, principalmente, a su capacidad para lixiviar minerales sulfurados complejos y de baja ley [3]. Para esto se utiliza la acción de diferentes sistemas microbianos en la recuperación de metales valiosos a través de su disolución (como oro, plata, plomo, uranio, etc.) así como en la eliminación de elementos que impiden que los procesos de recuperación sean más eficientes y eficaces (arsénico, manganeso, zinc, azufre, fósforo y otros) [4]. Por ejemplo, el 20 % del cobre extraído actualmente a nivel mundial utiliza procesos de biolixiviación (este proceso se usa en aproximadamente 20 minas de todo el mundo). Por lo anterior, la biolixiviación es una alternativa interesante y muy prometedora “como una de las técnicas del futuro” para el tratamiento de concentrados minerales sulfurados. De forma natural, con bajos costos y sin deteriorar el medio ambiente, permitiendo recuperar metales a partir de minerales, sobre todo de baja ley y refractarios, compitiendo con los procesos de extracción convencionales [5]. La biolixiviación es un proceso que hace uso de la acción bacteriana para separar las partes solubles de las insolubles en una fase sólida (pulpas de mineral), a través de bacterias (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *thiooxidans*, *caldu*, *Leptospirillum ferrooxidans*, etc.) que crecen en medios de cultivo con un pH menor a 5 [6].

Los productos de su mecanismo bioquímico son los iones sulfato y férrico. Gracias a estos metabolitos y al contacto directo del microorganismo con el mineral, pueden biolixiviar

metales con el objetivo específico de convertir sulfuros metálicos insolubles en sulfatos metálicos solubles. En este sentido, las bacterias quimiolitótrofas acidófilas son microorganismos que obtienen energía celular a partir de la oxidación de compuestos inorgánicos y pueden utilizar el CO<sub>2</sub> como fuente de carbono. Estos microorganismos actúan mediante tres mecanismos (ver figura 1):

1. **Ataque directo:** También conocido como lixiviación por contacto. Las bacterias a menudo se agrupan en consorcios sinérgicos formando biopelículas (*biofilm*) que se adhieren a la superficie de las partículas sólidas del mineral sulfurado, a esto se le conoce como ataque biológico. Es indispensable la existencia de una capa de lipopolisacáridos o de sustancias exopoliméricas (EPS) excretadas por la bacteria, pues es ahí donde tienen lugar las reacciones electroquímicas, en la interface entre la célula y el mineral. Las células bacterianas adheridas a los minerales oxidan los iones ferrosos a iones férricos y el azufre se oxida a iones sulfato. El mecanismo se lleva a cabo por enzimas microbianas (oxidadasas o reductasas) transportando electrones en la presencia de oxígeno, por ejemplo, *A. ferrooxidans* oxida FeS<sub>2</sub> y usa O<sub>2</sub> como aceptor de electrones, siguiendo la siguiente reacción (1):



La reacción de oxidorreducción presentada proporciona la energía necesaria para la respiración bacteriana y el crecimiento de las bacterias.

2. **Ataque indirecto:** Los microorganismos no tienen contacto directo con el mineral, es decir, permanecen en la fase líquida (bacterias pláctónicas, aproximadamente  $1 \times 10^6$  a  $1 \times 10^8$  células/mL), y llevan a cabo reacciones bioquímicas para su propia supervivencia. Las bacterias oxidan los iones Fe<sup>2+</sup> presentes en solución. Los cationes Fe<sup>3+</sup> resultantes se adhieren al mineral donde son reducidos; los compuestos sulfurados, donde se encuentra el metal de interés, son oxidados. Así, los iones Fe<sup>2+</sup> entran de nuevo al ciclo.
3. **Lixiviación cooperativa:** Esta consiste en la combinación sinérgica de las dos anteriores. Este es el mecanismo más común en un proceso de biolixiviación.

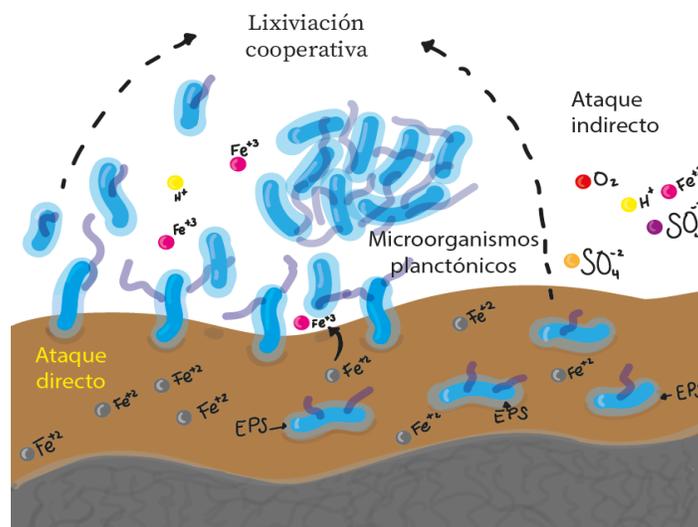


Figura 1. Mecanismo de acción de un proceso de biolixiviación

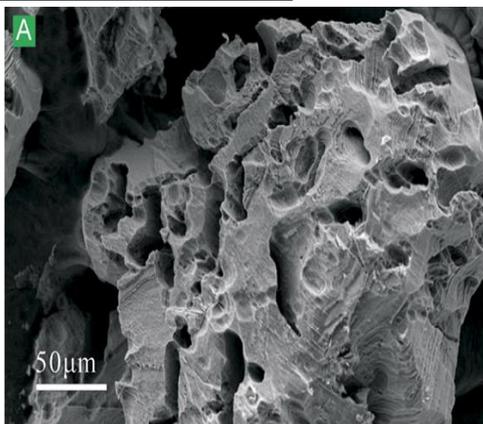
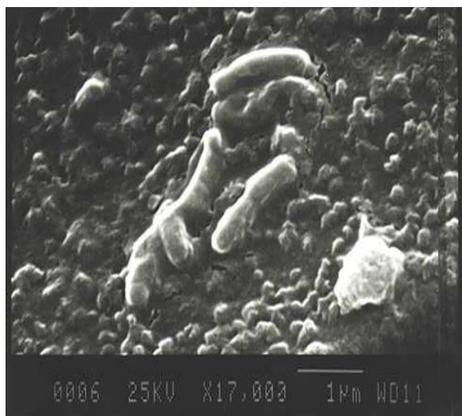
## Factores físicos y químicos que afectan la biolixiviación

Cabe mencionar que en la extracción de minerales mediante la biolixiviación, las propiedades reológicas de las pulpas de minerales cambian con el tiempo de proceso debido a una gran variedad de factores, tales como: la cantidad de fases sólidas, la cantidad de iones en la fase acuosa, cantidad de iones presentes en la superficie del mineral (capa de Stern), variedad y cantidad de bacterias presentes en ambas fases, tamaño y morfología del mineral, distribución del tamaño de partícula, pH, las propiedades físicas de cada fase, además de que las partículas minerales no son esféricas, y estas muestran alta anisotropía en su carga superficial [5- 9].

Los factores que influyen en la biolixiviación, como en cualquier otro proceso que implica la presencia de seres vivos, pueden ser variables ambientales, biológicas o fisicoquímicas que afectan el rendimiento de la extracción de metales [5-7]. Las condiciones óptimas de humedad, pH, temperatura, fuentes de energía y nutrientes tienen que existir junto con la ausencia de inhibidores posibles para el crecimiento de microorganismos implicados en el proceso. Por otro lado, las caracterizaciones reológicas (junto con la caracterización microestructural de las pulpas minerales) son aspectos decisivos para establecer los parámetros óptimos durante un proceso de biolixiviación y, por lo tanto, para la industria minera, donde se encuentran suspensiones coloidales altamente concentradas [9].

## Reología de las pulpas minerales sometidas a un proceso de biolixiviación

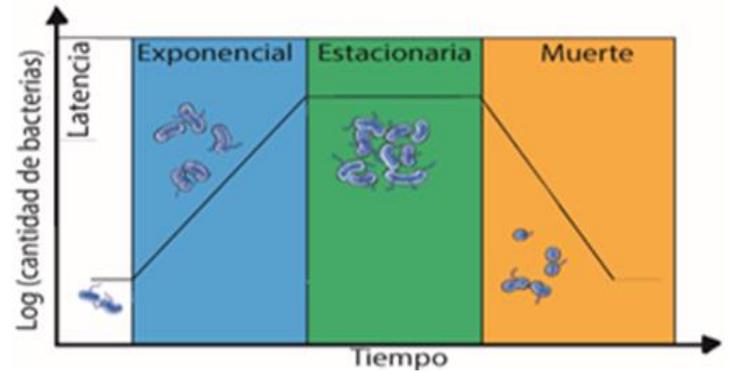
La reología (del griego *rheos*, “fluir” y *logos*, “estudio”) es una rama de la mecánica del medio continuo que estudia la relación entre la deformación y el esfuerzo de un material en condiciones de flujo [7]. Es decir, la reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de los materiales. Las pulpas minerales de concentrados de hierro sometidas a un proceso de biolixiviación suelen ser suspensiones coloidales de reología compleja, esto es debido a una amplia variedad de factores entre los que destacan la fase discontinua (partículas del mineral) compuesta por partículas rígidas de tamaño y forma variable, y la fase continua, mayoritariamente acuosa, donde se encuentran disueltos los sustratos para la sobrevivencia de los microorganismos acidófilos y los exopolisacáridos que estas excretan (Figura 2).



**Figura 2.** Microscopía de bacterias acidófilas (arriba) que actúan en la disolución de las impurezas de las pulpas de mineral (abajo) [2]

A pesar de la cantidad abrumadora de factores que afectan la respuesta reológica de este tipo de sistemas complejos, se ha observado que en sistemas en donde se involucra el

nacimiento, el crecimiento y la muerte de microorganismos, los parámetros como la viscosidad de la fase acuosa y viscoelasticidad de la biocapa (*biofilm*) en las pulpas de mineral aumentan conforme la población bacteriana aumenta. También se ha reportado una disminución de la respuesta viscosa y viscoelástica cuando los microorganismos perecen, es decir, en la etapa de muerte (Figura 3) [8, 9].



**Figura 3.** Cinética de crecimiento (Harvey, R., et al., 2008) [10]

Por lo general, las cinéticas de biolixiviación tienen una duración de entre 4 y 24 días. En la práctica, durante las pruebas reológicas, el efecto de la cinética bioquímica se considera despreciable. Por otro lado, si factores tales como la temperatura, la presión externa y la velocidad de agitación (si se llevan a cabo en un tanque de agitación continua) se mantienen fijas, la respuesta reológica de las pulpas minerales sometidas a un proceso de biolixiviación estará dada únicamente por la cantidad de microorganismos que se encuentren presentes en el medio.

Una prueba muy común en reología es la llamada *flujo cortante simple estacionario*, en la cual, como su nombre lo sugiere, el material de interés en forma líquida se somete a un flujo controlado dentro de una configuración reométrica y se hace incidir un esfuerzo cortante, que en su conjunto se estima en un *reómetro*, para generar un campo de velocidades lineal con la posición (flujo homogéneo). Este tipo de prueba de flujo provoca una gran deformación al material, el cual rápidamente se orienta en dirección al flujo. En la práctica se obtiene una muestra directamente del biorreactor a nivel laboratorio de 7 L en el proceso de biolixiviación para la purificación de concentrados de hierro (figura 4) a diferentes días de muestreo de la cinética de biolixiviación, y se obtienen las llamadas curvas de flujo a la cizalla simple en estado estacionario, donde se grafica la función viscosidad  $\eta$  contra la rapidez de deformación  $\dot{\gamma}$  (en escala logarítmica). De hecho, dicha respuesta reológica también puede ser modelada reológicamente.



**Figura 4.** Biorreactor (superior izquierda), pulpa mineral (superior derecha), reómetro de esfuerzo controlado DHR3 (inferior izquierda) y sistema reométrico (inferior derecha)

En la actualidad existen una gran variedad de modelos reológicos que pueden predecir el comportamiento experimental, véase por ejemplo el modelo BMP [11-12]:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\eta_{oi}\beta_i\dot{\gamma}^2 - 1 + \sqrt{(\beta_i\eta_{oi}\dot{\gamma}^2 - 1)^2 + 4\eta_{oi}\beta_i\left(\frac{\eta_{oi}}{\eta_{\infty i}}\right)\dot{\gamma}^2}}{2\beta_i\left(\frac{\eta_{oi}}{\eta_{\infty i}}\right)\dot{\gamma}^2} \right]$$

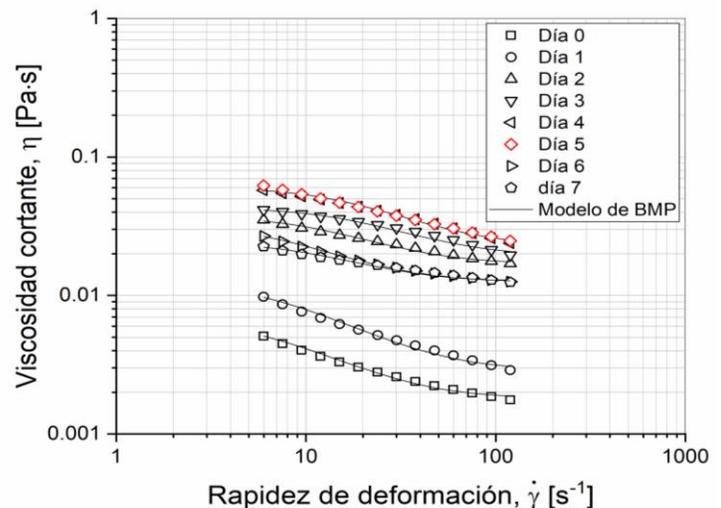
Donde  $\beta = \kappa\lambda = \frac{\kappa}{\lambda^{-1}}$ . Esta es la relación de la constante cinética para la modificación estructural y la constante cinética para la estructura. Las restricciones para los parámetros de ajuste empleando el modelo BMP fueron las siguientes:  $\eta_{0n} < \eta_{0(n-1)} < \eta_{0(n-2)} < \dots < \eta_{01}$ ,  $\eta_{\infty n} < \eta_{\infty(n-1)} < \eta_{\infty(n-2)} < \dots < \eta_{\infty 1}$  y  $\beta_i < \beta_{(n-1)} < \beta_{(n-2)} < \dots < \beta_1$  minimizando el número de modos n requeridos para el ajuste.

Este modelo (BMP), es muy útil cuando se observa que las curvas de viscosidad exhiben un cambio de pendiente, tal como puede verse en la figura 5, y para cada punto de inflexión puede emplearse un modo.

**La población de bacterias en el medio afecta la respuesta reológica de las pulpas minerales**

En la figura 5 se aprecia que, durante toda la cinética lixivante llevada a cabo en un biorreactor, la viscosidad de las pulpas minerales sometidas a biolixiviación disminuye conforme la rapidez de deformación aumenta, a este tipo de materiales, en reología, se le conocen como fluidos adelgazantes al flujo ( $n < 1$ , donde, n es el índice de adelgazamiento al flujo). Adicionalmente, conforme avanza la cinética de un proceso de biolixiviación, la pendiente de adelgazamiento disminuye, lo que indica una fuerte estructuración del fluido, es decir, existen varios puntos de contacto intermoleculares entre las partículas minerales debido, probablemente, a la lixivación cooperativa. Nótese como al día 5 del proceso de biolixiviación se alcanza la máxima respuesta reológica, es decir, a este día del proceso de biolixiviación los microorganismos se encuentran en la etapa estacionaria de crecimiento.

Es por ello que, en una prueba de *flujo oscilatorio de pequeña amplitud de deformación*, las pulpas de mineral caracterizadas reológicamente (figura 6) cuando se someten a un esfuerzo cortante sinusoidal con el tiempo, consecuentemente, el material sufrirá una deformación desfasada (cosenoidal) con el tiempo. El desfase anterior se presenta en la gran mayoría de las pulpas minerales, presentando tanto propiedades de un sólido (memoria perfecta) como propiedades de un fluido (deformación continua e irreversible); en otras palabras, se trata de materiales viscoelásticos. La preponderancia de una u otra propiedad se estima con el módulo elástico ( $G'$ ) y el módulo viscoso ( $G''$ ). Si los módulos son independientes de la deformación aplicada  $\gamma_0$ , el material se encontrará en la llamada zona viscoelástica lineal: la parte elástica se comporta como un sólido de Hooke y la parte viscosa como un fluido newtoniano (o no newtoniano).



**Figura 5.** Prueba de flujo cortante simple estacionario de la biolixiviación de concentrados de hierro

En consecuencia, en la figura 6 se puede observar que durante toda la cinética de biolixiviación el módulo viscoso ( $G''$ ) predomina sobre el módulo elástico ( $G'$ ), es decir,  $G'' > G'$ . Además, al igual que en la prueba de flujo de cizalla simple, se alcanza la máxima respuesta viscoelástica al día 5. El hecho de que  $G''$  sea mayor que  $G'$  se debe a que las pulpas minerales se encuentran en un medio continuo. Sin embargo, el aumento simultáneo de  $G'$  y  $G''$  con la cinética lixivante indica que la concentración de microorganismos aumenta. De hecho, en el día 5 de biolixiviación a altas frecuencias se tiene una respuesta reológica de interés. Dos investigadores (Winter-Chambon) descubrieron que, durante una transición de fase líquida-sólida,  $G'$  y  $G''$  dependen de la frecuencia representada por una función tipo ley de potencia, a esta transición de fase se le conoce como "punto de gel" [13-14]. Con el criterio de Winter-Chambon [13-14], las pulpas minerales al día 5 de biolixiviación se comportan como un *gel débil*, esto probablemente se deba a la alta concentración de exopolisacáridos o *biofilm* las pulpas del mineral [6]. Los módulos viscoelásticos ( $G'$  y  $G''$ ) pueden obtenerse teóricamente por medio de los llamados modelos mecánicos (reológicos). El mostrado en la gráfica corresponde al modelo multimodal de Maxwell con tres tiempos característicos [15].

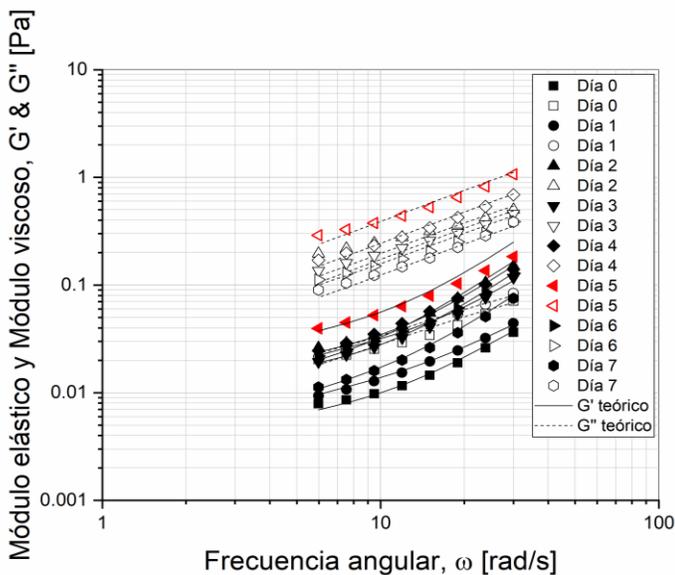


Figura 6. Prueba de flujo oscilatorio de pequeña amplitud de deformación de la biolixiviación de concentrados de hierro

**El comportamiento reológico de un proceso de biolixiviación deriva de la gran cantidad de interacciones entre los componentes del sistema**

Lo anterior se explica porque las pulpas de mineral, durante la biolixiviación, presentan características reológicas de una transición de fase y un comportamiento viscoelástico con varios tiempos característicos en función de la complejidad y cinética del sistema (figura 7). Al realizar el modelado de la respuesta viscoelástica lineal se obtiene la llamada viscosidad a baja rapidez de deformación  $\eta_0$ . La viscosidad a baja rapidez de deformación  $\eta_0$  depende de la concentración de microorganismos y de la formación de exopolisacáridos (EPS) en el mineral. La cinética involucrada en la biolixiviación es proporcional al crecimiento de la población bacteriana.

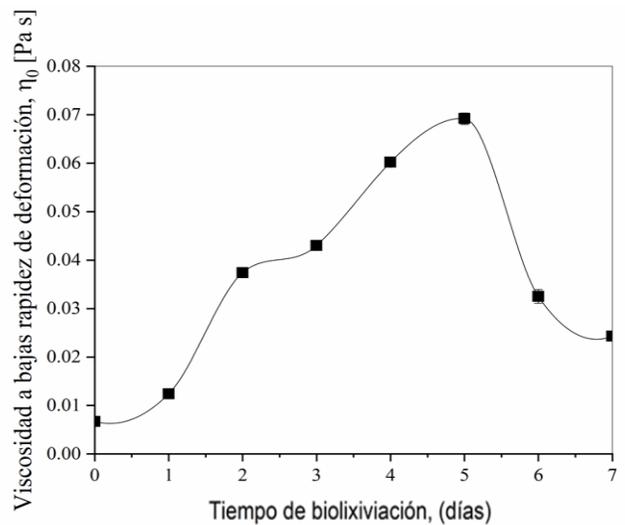


Figura 7. Reología de la cinética de biolixiviación que es similar a la curva de desarrollo bacteriano

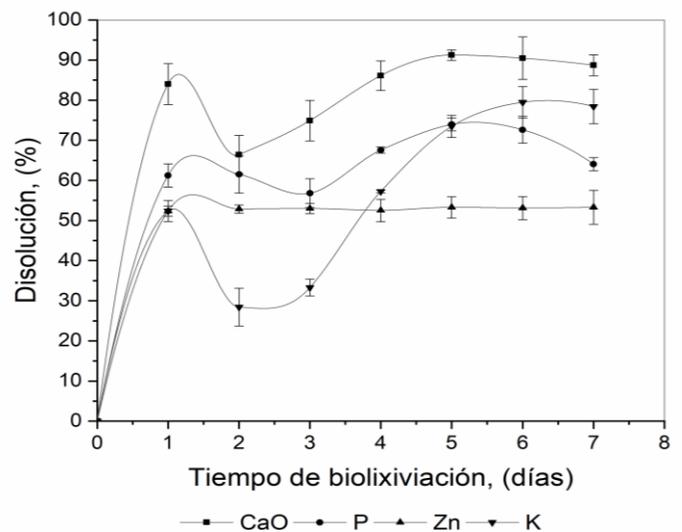
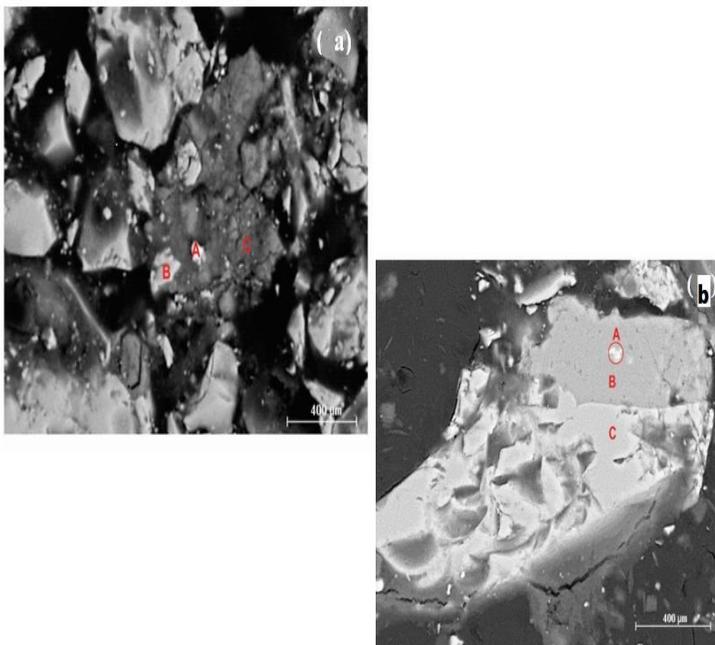


Figura 8. Disolución de impurezas del concentrado de hierro con el tiempo de biolixiviación

Los resultados anteriores son congruentes con el análisis elemental de un concentrado de mineral de hierro (ver figura 8), en donde se observa que la máxima disolución de impurezas de varios elementos (P, K, Zn y CaO) presentes en la pulpa del mineral en función del tiempo se logra al día 5 de biolixiviación. Además, en el primer día de biolixiviación, el zinc (Zn) presenta un porcentaje de disolución del 53.3 %, seguido de un valor casi constante durante el tiempo restante de proceso. Así mismo, se disuelve más de un 71.52 % de P, 91.25 % de CaO y 74 % de K, lo que eleva la Ley de Fe en un 2.9 % (pureza). Lo anterior se puede explicar mediante un análisis de la morfología por medio de microscopía de barrido (SEM) y el análisis por difracción de rayos X del mineral, antes y después del proceso de biolixiviación. Ahí se muestra la migración de elementos en sistemas cristalinos hacia otros sistemas cristalinos.



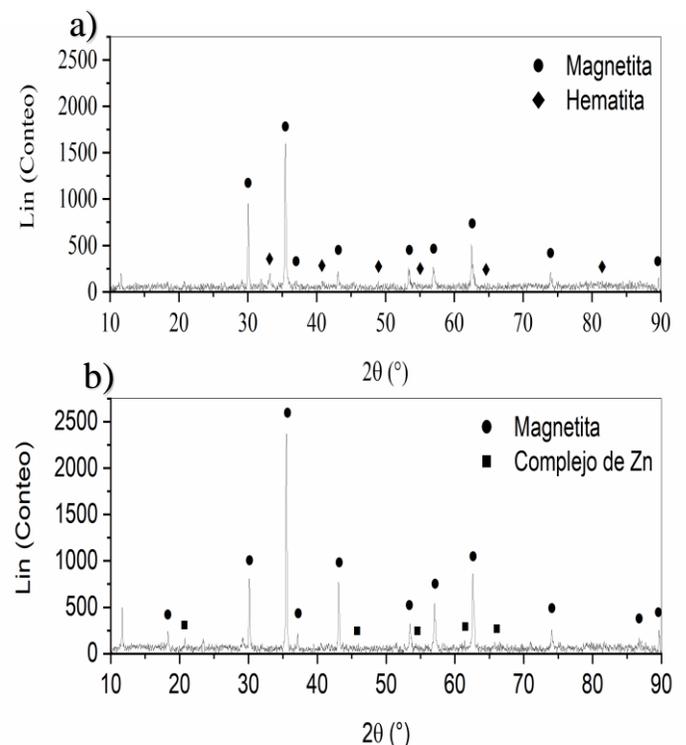
**Figura 9.** Micrografía SEM. (a) Fase sólida del complejo de mineral (Cu-Fe) antes de la biolixiviación (b) y después de la biolixiviación

En la figura 9 (a) se aprecian partículas pequeñas de complejos de hematita (B), partículas de carbonatos de calcio (C) y partículas de complejos de Zn y Cu (A), todas ellas adheridas a una matriz de partículas aglomeradas compuestas, principalmente, de óxido de hierro.

Por otro lado, en la Figura 9 (b) se aprecia la micrografía del mineral después del proceso de biolixiviación. Se observa la existencia de partículas de magnesio – ferrita (C), partículas de

complejos de Zn y Fe con distinto contenido de elementos (B y A), respectivamente; todas como incrustaciones en una matriz de partículas conglomeradas de óxido de hierro. Finalmente, en la figura 10 (a) se muestran los picos de intensidad de los ángulos de difracción de planos cristalográficos que cumplen con la Ley de Bragg del mineral antes de ser sometido al proceso de biolixiviación [16].

En un comienzo, el mineral está compuesto principalmente por fases cristalinas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), esto es natural, puesto que se trata de un mineral con alto contenido de hierro para purificación dentro de un proceso industrial. Los picos de baja intensidad presentes en el patrón de difracción de la figura 10 (a) evidencian la gran complejidad de la composición del mineral, sin embargo, no son lo suficientemente relevantes para relacionarlos con planos cristalográficos de otros tipos de cristales. En la figura 10 (b) se muestra el difractograma del mineral después de ser sometido a la oxidación biológica y, en contraste con la figura 10 (a), en esta prueba ya no se detectaron planos cristalográficos que cumplan con la Ley de Bragg de hematita, en cambio, otros planos cristalográficos de complejos de Zn han sido detectados debido a la biolixiviación.



**Figura 10.** Difractogramas: (a) Difractograma de la composición del mineral antes de la biolixiviación y (b) después de la biolixiviación.

## Conclusiones

Desde el punto de vista reológico, las pulpas de mineral exhiben un comportamiento de un fluido no newtoniano del tipo adelgazante al flujo ( $n < 1$ ). Además, poseen una respuesta viscoelástica con una componente viscosa dominante sobre la componente elástica ( $G'' > G'$ ) en la ventana de flujo.

La cantidad de bacterias presentes y los elementos disueltos en la fase acuosa afectan el comportamiento reológico, de hecho, se puede afirmar que aumentan la respuesta viscoelástica. Este comportamiento de un *fluido de reología compleja* en las pulpas de mineral se debe a la gran variedad de interacciones entre los componentes presentes y que, en general, son fuerzas intermoleculares de tipo Van der Waals.

Finalmente, los valores de los parámetros reológicos, en particular la viscosidad, son muy útiles en el diseño de diversos equipos para el procesamiento de las pulpas minerales (por ejemplo, en el diseño y optimización de biorreactores del tipo CSTR), o bien, para el escalamiento de los procesos de biolixiviación, que están despertando gran interés en la industria minera actualmente.

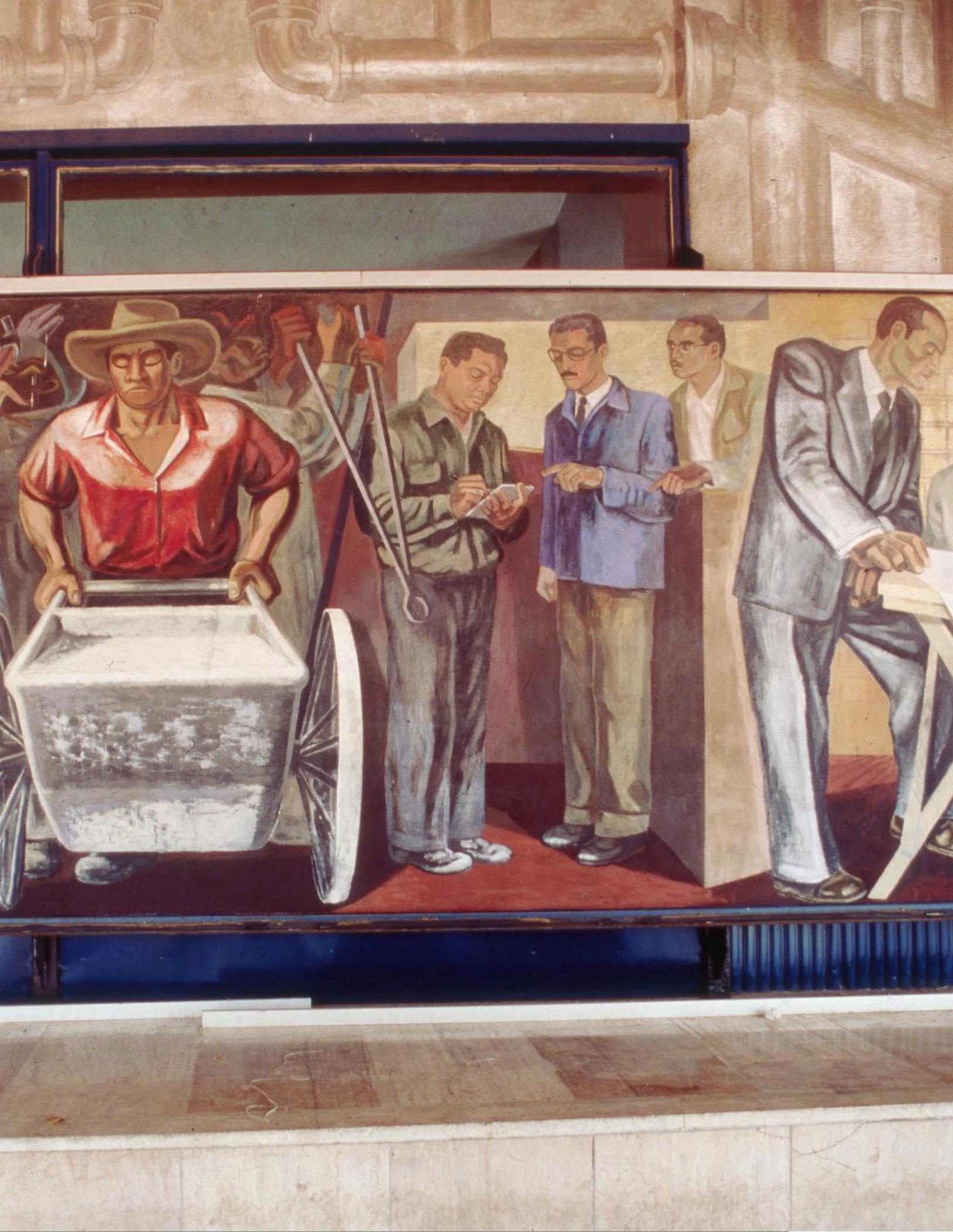
**La reología es un método indirecto para conocer el tiempo óptimo de biolixiviación para la eliminación de impurezas de un concentrado de hierro. Es posible aplicar este mismo principio para la purificación de otros tipos de concentrados minerales (como por ejemplo oro, plata, plomo, uranio)**

**Nota:** El trabajo realizado en el presente artículo, fue merecedor del segundo lugar de la décima edición del Programa para el Fomento al Patentamiento y la Innovación (PROFOPI) del 2022.

## Referencias

- Ospina Correa, J. D., Osorno Bedoya, L., Giraldo Builes, J., Mejía Restrepo, E., & Márquez Godoy, M. A. (2011). Aplicaciones biotecnológicas en minería aurífera: Estado del arte sobre la oxidación bacteriana de arsenopirita (FeAsS). *Informe Técnico*, 75, 53–65. <https://doi.org/10.23850/22565035.20>
- Brierley, C. L., & Brierley, J. A. (2013). Progress in bioleaching: Part B: Applications of microbial processes by the minerals industries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97 (17), 7543–7552.

- Brandl, H. (2001). Capítulo. 8 *Microbial Leaching of Metals*. 192–223.
- Rodríguez, Y., Ballester, A., Blázquez, M., L., González, F., Muñoz, J., A. (2001). La biolixiviación al comienzo del siglo XXI. *Revista de Metalurgia*. 37, 616 – 627.
- Shiers, D., W., Collinson, D., M., Watling, H., R. (2016). Life in heaps: a review of microbial responses to variable acidity in sulfide mineral bioleaching heaps for metal extraction. *Research in Microbiology*. 167, 576 – 586.
- Valdés, J., Pedroso, I., Quatrini, R., Dodson, R., J., Tettelin, T., Blake, R., Eisen, J.A., Holmes, D. (2008). *Acidithiobacillus ferrooxidans* metabolism: from genome sequence to industrial applications. *BioMed Central Genomics*. 9 (597).
- Barnes, H., A., Hutton, J., F., Walters, K. (1989). *An introduction to Rheology*. Amsterdam., Elsevier.
- Patricio, P., Almeida, P., L., Portela, R., Sobral, R., G., Grilo, I., R., Cidade, T., Leal, C., R. (2014). Living bacteria rheology: population growth, aggregation patterns and cooperative behavior under different shear flows. *Biological Physics*. 1, 1403 – 1405.
- Núñez Ramírez, D. M., Medina Torres, L., Calderas, F., Lara, R., Medrano Roldán, H. (2018). Bioleaching process for silver recovery: Structural and rheological studies. *Minerals Engineering*. 121, 122 – 128.
- Harvey, R., Champe, P., Fisher, B. (2008). *Microbiología*. Piscataway, New Jersey: University of Medicine and Dentistry of New Jersey, Ed. LWW.
- Bautista, F., de Santos, J., M., Puig, J., E., Manero, O. (1999). Understanding thixotropic and antithixotropic behavior of viscoelastic micellar solutions and liquid crystalline dispersions. I. The model. *Journal of Non – Newtonian Fluid Mechanics*. 80, 93 – 113.
- Caram, Y., Bautista, F., Puig, J., Manero, O. (2005). On the rheological modeling of associative polymers. *Rheologica Acta*. 46(1), 45 – 47.
- Chambon, F. and H.H. Winter. (1987). Linear Viscoelasticity at the Gel Point of a Crosslinking PDMS with Imbalanced Stoichiometry. *Journal of Rheology*. 31, 683–697.
- Winter, H., H., Mours, M., Ewen, B., Richter, D., Shiga, T. (1997). Rheology of polymers near liquid – solid transitions. *Advances in Polymer Near Liquid – Solid Trans*. 165 – 224.
- Macosko, C.W., *Rheology: Principles, Measurements and Applications*. 1994, Weinheim: Wiley-VCH.
- Akhgar, B., N., Pourghahramani, P. (2016). Mechanochemical reduction of natural pyrite by aluminium and magnesium. *J. of Alloys and Compounds*. 657, 144 – 151.



# Nanocapa SakCu<sup>®</sup>: pruebas de seguridad y funcionalidad

C. Ramos-Vilchis<sup>1</sup>, E. Hernández<sup>1</sup>, F. García-López<sup>1</sup>,  
D. Pérez<sup>1,2</sup>, S. E. Rodil<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Materiales,  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Circuito Exterior s/n. Ciudad Universitaria, 04510. CDMX

<sup>2</sup>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco,  
Av. Universidad s/n, Magisterial, 86040, Villahermosa, Tabasco

[srodil@unam.mx](mailto:srodil@unam.mx)

## Resumen

El presente artículo resume un gran número de pruebas a las que fueron sometidas la nanocapa de plata-cobre SakCu<sup>®</sup> para asegurarnos de que estaban fuertemente adheridas al polipropileno, sin riesgo de desprenderse por efecto de rayado o del flujo de aire a través del material, aún en condiciones extremas. Confirmada la seguridad, y después de evaluar las propiedades antimicrobianas y de biocompatibilidad de la nanocapa, se procedió a diseñar un cubrebocas para el público en general, cuidando que fuese un sistema reutilizable, pero que a su vez ofreciera protección al usuario y a la gente a su alrededor. Para esto fue necesario aprender y entender aquellos mecanismos de transmisión del virus SARS-CoV-2, el funcionamiento de cada tipo de sistema de protección respiratoria, sus normas e incluso entender cómo es que las partículas son atrapadas por las fibras que componen a un cubrebocas. Se presenta un extracto de esta información en forma de opinión crítica al respecto.

## Antecedentes

Desde la declaración de la pandemia por el SARS-CoV-2 en 2020, un nuevo elemento ha entrado a formar parte de nuestra vida diaria y vestuario: el cubrebocas, mascarilla, tapabocas o barbijo [1]. Hoy, después de 2 años de usarlo nos encontramos con una gran variedad de modelos y nombres. Las mascarillas de alta eficiencia (respiradores) se han nombrado de acuerdo con la exigencia de filtrado que demanda la norma, como se resumen en la tabla 1, donde puede verse el país o región donde son fabricados [2].

**Tabla 1.** Normas aplicables en cada país para definir la eficiencia de los respiradores

Modelo	Norma	País
<b>N95, N99 o N100</b>	NOM-116-2009	México
<b>N95, N99 o N100</b>	NIOSH 42CFR84.181	USA
<b>KN95, KN100</b>	GB2626-2006/GB2626-2019	China
<b>FFP2, FFP3</b>	EN 149: 2001	Europa
<b>KF94</b>	KMOEL-2017-64	Corea
<b>P2, P3</b>	AS/NZS 1716:2012	Australia
<b>PFF2, PFF3</b>	ABNT/NBR 13689:2011	Brasil
<b>DS/DL2, DS/DL3</b>	JMHLW-2000	Japón

Por otro lado, se tienen todos los cubrebocas convencionales utilizados por personal a nivel hospitalario, los que denominamos mascarillas quirúrgicas, tricapas o plisados. Estos no están sujetos a las mismas normas de los respiradores. Fueron diseñados para evitar que el personal de salud genere infecciones en las heridas abiertas de los pacientes y, a su vez, los protege de salpicaduras de sangre; deben cumplir una norma diferente donde se determinan estos factores.

Al inicio hubo muchas dudas respecto de la eficiencia y necesidad de usar los sistemas de protección respiratoria [3] para evitar los contagios. Sin embargo, rápidamente se hizo evidente que coadyuvaban para reducir las infecciones, pero debido a la falta de insumos suficientes, se sugirió el uso de cubrebocas caseros, de tela o reutilizables. En una situación ideal, la recomendación del tipo de protección a utilizar debería ser definida por los mecanismos de transmisión del patógeno. Para el SARS-CoV-2 hubo demasiadas dudas al respecto y cada país tomó sus propias políticas.

## Mecanismo de transmisión y sus implicaciones

Los comunicados oficiales en 2020 indicaban que el principal mecanismo de transmisión del SARS-CoV-2 era la transmisión directa, la cual ocurre a través de las gotitas respiratorias producidas al toser o estornudar, de aquí la importancia de limitar el contacto durante el saludo y mantener la sana distancia. Como segundo mecanismo de transmisión indirecta se propuso que la transmisión ocurría a través de objetos o materiales contaminados con las gotitas (fómites), esto determinaba la necesidad de “sanitizar” todos los objetos y lugares. Se insistía en que no ocurría la transmisión aérea (vía aerosoles) aunque esto fue discutido por la comunidad científica, quienes posteriormente aportaron suficientes evidencias de lo contrario [4-7].

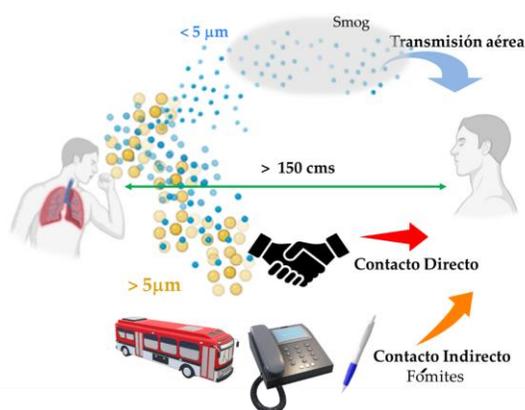


Figura 1. Mecanismos de Transmisión del virus SARS-CoV-2

En mayo de 2021 [8], la CDC (*Centers for Disease Control and Prevention*) de Estados Unidos finalmente cambió esta clasificación, reconociendo como los principales mecanismos de transmisión, en orden de mayor a menor:

- (1) **Transmisión aérea:** inhalación de gotitas respiratorias muy finas y partículas de aerosol.
- (2) **Transmisión directa:** deposición de gotitas y partículas respiratorias en las mucosas expuestas en la boca, la nariz o el ojo por salpicaduras directas y aerosoles.
- (3) **Transmisión indirecta:** tocar las mucosas con las manos contaminadas directamente por fluidos respiratorios que contienen virus o indirectamente al tocar superficies con virus en ellas.

La transmisión aérea se hizo evidente con la aparición de las nuevas variantes, cuya tasa de transmisión no podía

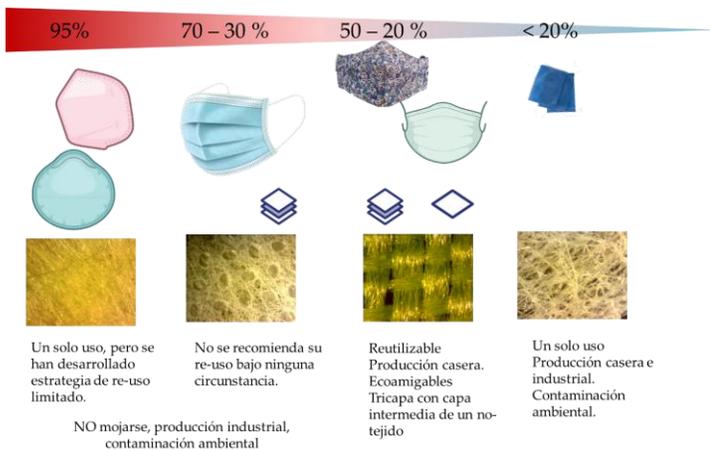
controlarse considerando únicamente las medidas indicadas durante el 2020 [9]. La variante Ómicron ha sido declarada el virus de mayor infectividad de toda la historia de la humanidad, superando al sarampión [10]. Es decir, su número de reproducción básico **Ro** (el número promedio de casos nuevos que genera un caso dado a lo largo de un período infeccioso) es superior al de sarampión, el cual está reportado entre 12-18. Estudios posteriores [11] demostraron efectivamente que el **Ro** de la variante Ómicron (reportado entre 5.5-24) es mayor que la variante Delta y que las variantes originales del SARS-CoV-2 (**Ro** entre 1.2 y 5.7). Este aumento en la **Ro** indica, a su vez, que el virus, con sus mutaciones, ha desarrollado una transmisibilidad intrínseca mayor y la habilidad de escapar al sistema inmunológico [11, 12].

Cuando se aceptó la transmisión aérea (único mecanismo para explicar la alta transmisibilidad) fue necesario reconsiderar las medidas preventivas. Los individuos producimos aerosoles y gotitas (o gotículas) respiratorias durante diversas actividades (respirar, hablar, cantar, ejercitarnos, estornudar y toser) [13, 14]. Las gotitas caen rápidamente al suelo (o a superficies) en segundos o minutos por efecto de la gravedad, lo que asegura que al mantener la sana distancia (5 pies o 150 cm) se disminuye la probabilidad de contagio. Pero los aerosoles permanecen en el aire por tiempo prolongado (de minutos a horas) y son transportados a distancias mucho mayores, dependiendo de las condiciones ambientales. Aun manteniendo la sana distancia, podemos inhalar los aerosoles con el virus y ser contagiados [15, 16].

Al inicio, se nos indicó que las gotitas respiratorias tenían tamaños superiores a 5 micras, mientras que los aerosoles eran menores. Sin embargo, dentro de la ciencia de los aerosoles, no es el tamaño lo que define a un aerosol, sino el tiempo que las partículas pueden permanecer en el aire [17-19]. Un aerosol es un coloide de partículas sólidas o líquidas, cuyo tamaño varía de  $0.002 \mu\text{m}$  (2 nm) y hasta  $100 \mu\text{m}$  [20], suspendidas en un gas. El valor de  $100 \mu\text{m}$  representa el tamaño más grande de partícula que puede permanecer suspendida en aire inmóvil por más de 5 segundos, desde una altura de 1 metro y medio. Es decir, para los estudiosos de los aerosoles, las partículas de 5 a 100 micras expelidas por una persona son consideradas como aerosoles si las condiciones de ventilación, humedad, etc., les permiten permanecer en el aire por más de 5 segundos. Además de esta diferencia en la definición, la comunidad científica aportó muchas más evidencias de la transmisión aérea del SARS-CoV-2, que afortunadamente ha sido aceptada por los organismos reguladores [8].

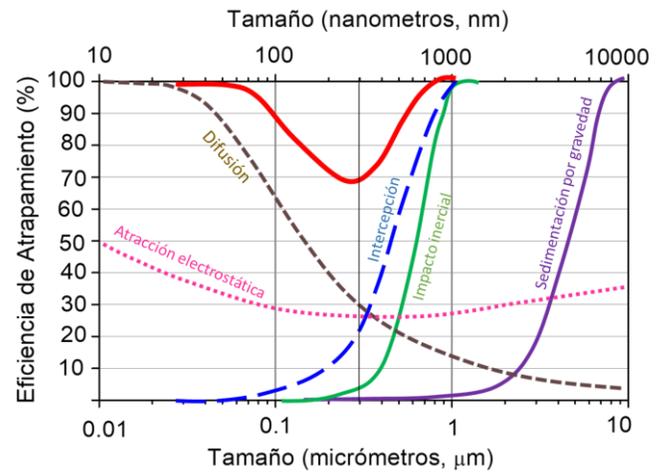
## Eficiencia de Filtrado

Analicemos a fondo las diferencias entre los cubrebocas, mascarillas y respiradores en términos de su eficiencia al filtrado de aerosoles (figura 2) que, como vimos, pueden variar en tamaño, desde los dos hasta los miles de nanómetros. Estos aerosoles pueden llevar el virus y ser inhalados si alcanzan a pasar del material filtrante del cubrebocas o por las zonas donde el cubrebocas no ajusta perfectamente a la cara. Por lo tanto, la eficiencia de las mascarillas debe tomar en cuenta ambos aspectos: filtrado y ajuste, además de que deben permitirnos respirar con la menor dificultad.



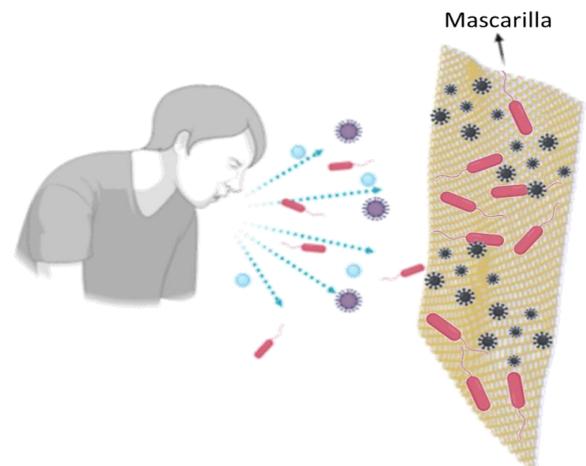
**Figura 2.** Clasificación de los equipos de protección personal según su eficiencia al filtrado de partículas

Los respiradores mencionados cumplen muy bien con las tres características. La eficiencia reportada está definida por la capacidad de los textiles de atrapar a las partículas, la cual depende del diámetro de las fibras que componen al textil, su distribución ordenada (textil tejido) o desordenada (textil no tejido), el tamaño de los poros y propiedades de carga eléctrica que permitan atraer a las partículas. La ciencia de fluidos ha estudiado estos procesos desde hace muchos años y ha concluido que hay un rango de tamaños que es más difícil de atrapar, este se encuentra entre las 0.2 y 0.4 micras (200-400 nm) [2, 21, 22]. Es decir, la eficiencia de filtración generalmente presenta un mínimo alrededor de este intervalo de tamaños y se le conoce como el tamaño de partícula más penetrante. Por ello, las normas con las cuales se clasifican las mascarillas proponen la medición de eficiencia de filtrado para partículas de NaCl o parafina en un intervalo alrededor de 0.3 micras (300 nm). Tamaños mayores (o incluso menores) seguro podrán atraparse con mayor eficiencia. Por lo tanto, en las normas este tamaño no está definido por el tamaño de virus (0.1-0.3 micras) o bacterias (1-3 micras), sino por leyes de la dinámica de fluidos.



**Figura 3.** Efecto de procesos de atrapamiento de partículas por las fibras, que al sumarse (línea roja) dan como resultado un mínimo en la eficiencia de atrapamiento alrededor de 0.3 μm [21]

Los respiradores están hechos de tejidos sintéticos (polímeros) no tejidos, porque así se pueden fabricar fibras más delgadas que las naturales (por ejemplo, el algodón), más desordenadas, con menor porosidad e incluso dotarlos con cierta carga eléctrica que promueva la atracción electrostática de las partículas. Aun así, se requieren más de tres capas para alcanzar las altas eficiencias, incluso algunos llegan a tener hasta seis capas de diferentes polímeros. La función de estas capas es atrapar partículas, es decir a los virus, bacterias y hongos (los microorganismos patógenos) presentes en las gotas o aerosoles. Los microorganismos quedan allí atrapados (figura 4). Es por ello que las superficies de los respiradores deben ser consideradas como materiales contaminados [23]. Los cubrebocas no deben ser tocados, por el riesgo de infectarnos y deben ser debidamente desechados después de cuatro horas de uso continuo.



**Figura 4.** Ilustración del atrapamiento de los microorganismos en las fibras de las mascarillas

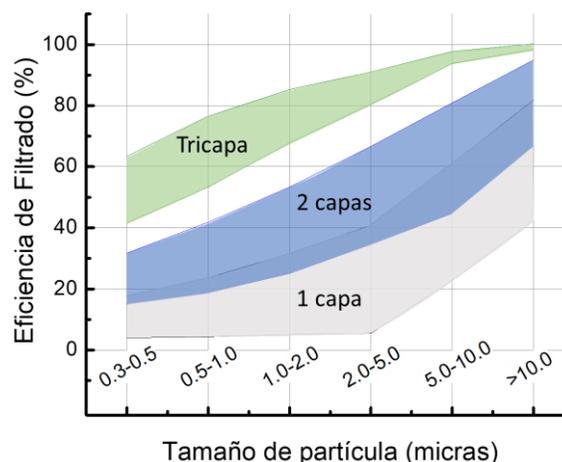
Las necesidades de la pandemia han hecho que, incluso en los hospitales, estas reglas de uso no sean del todo aplicadas. Incluso se han buscado mecanismos de desinfección para reutilizarlos de forma segura.

El siguiente tipo de mascarilla de uso médico (y el más utilizado en todos los ambientes hospitalarios) es la mascarilla quirúrgica. Se trata de una *joya de diseño* para evitar que el personal médico infecte a los pacientes con sus propias partículas respiratorias. No fue diseñada para proteger de las partículas externas a quienes la usan, sino para proteger a los pacientes (aunque sí disminuyen el riesgo de salpicaduras de sangre al usuario). Están hechas de un material tricapa ignífugo denominado SMS (polipropileno) y su ajuste alrededor de la nariz se asegura con una especie de clip. La norma regulatoria no demanda mediciones de eficiencia de filtrado de partículas, sino de eficiencia de filtrado bacteriano (95 %), es decir, partículas viables de entre 1 y 3 micras de tamaño. Durante la pandemia han sido el principal escudo del personal médico y, por lo mismo, muchos estudiosos se han preocupado de medir la eficiencia de filtración que proveen en comparación con los respiradores. Se han reportado valores entre 30 y 70 % (muy variados, porque no se miden siguiendo el procedimiento de las normas). Su principal desventaja es un bajo nivel de sellado, para el cual se han demostrado algunas estrategias de uso para mejorarlo. Pero igual debemos considerar que los microorganismos quedan atrapados en las fibras y, por lo tanto, deben desecharse después de cuatro horas de uso continuo, junto con el material médico contaminado.

Hay otros cubrebocas más sencillos, los higiénicos o sanitarios, que también son de uso hospitalario. Están hechos de dos capas poliméricas no tejidas (poliéster). No están sujetos a la misma norma que los quirúrgicos y su eficiencia de filtrado es mucho menor (< 20 %).

Al inicio de la pandemia solo teníamos disponibles algunos de estos tres tipos (además de los respiradores de uso industrial). Aparecieron rápidamente miles de recomendaciones para hacer nuestros propios cubrebocas de tela y tener, al menos, algún tipo de protección ante el virus. Inmediatamente aparecieron estudios midiendo la eficiencia de filtración que pueden proveer diferentes telas tejidas, o combinaciones de estas, en dos o tres capas. En la comunidad europea (p. ej. España: UNE 0065, Francia: AFNOR SPEC S76-001: 2020, Bélgica: SWiFT 19:2020+ACI:2020), se propusieron normas alternas para incluir los que denominaron “cubrebocas de tela reutilizable o comunitarios”. Esta recomendación sugería el uso de tres capas, donde se incluía una capa intermedia de tejido sintético no tejido para asegurar una

mayor capacidad de filtración. Se sugería el uso de un textil natural (algodón o bambú) para la capa interna, mientras que la externa podía ser de algodón o poliéster. También se sugería cierto porcentaje de eficiencia de filtrado, ya sea 70 % para partículas de cloruro de sodio de 3.0 micras de tamaño o 70 % de filtrado bacteriano. Sin embargo, en nuestro país no se establecieron normas y el diseño de cubrebocas de tela (tanto en modelo como en material) se realizó por los particulares sin recomendaciones a seguir. Es difícil generalizar sobre la eficiencia de filtrado o de ajuste de los cubrebocas de tela, en la literatura aparecen valores desde 20 a 80 %. La figura 5, adaptada de Bagheri y cols. [24], muestra como aumenta la eficiencia al añadir más capas y, en particular, el tricapa con filtro de polipropileno (PP) alcanza en promedio 50 % de eficiencia en el intervalo de 0.3 a 0.5 micras. Hasta hoy, el uso de cubrebocas de tela permitió a mucha de la población mundial trabajar y mantenerse a salvo. Courtney y Bax [25] propusieron que los cubrebocas de tela funcionaron como protección, a pesar de tener tan baja eficiencia de filtración y ajuste, debido a que la humedad en la parte interna del cubrebocas estimula al sistema inmunológico. Eikenberry y cols. [3], usando modelos matemáticos aplicados a datos reales de contagios en Estados Unidos (previos a abril de 2020), demostraron que el uso masivo de cubrebocas (80 % de la población), aun de eficiencias intermedias (50 %), reduce la transmisión comunitaria, decrece las hospitalizaciones y tasa de muertes diarias entre un 34-58 %. Similarmente, un estudio cuantitativo del mecanismo por el cual diferentes telas pueden bloquear gotas de alrededor 100 nm de tamaño a diferentes velocidades concluye que 2 o 3 capas de telas tejidas pueden bloquear eficientemente gotas expelidas a velocidades similares a las de expulsión cuando se tose o estornuda [26].

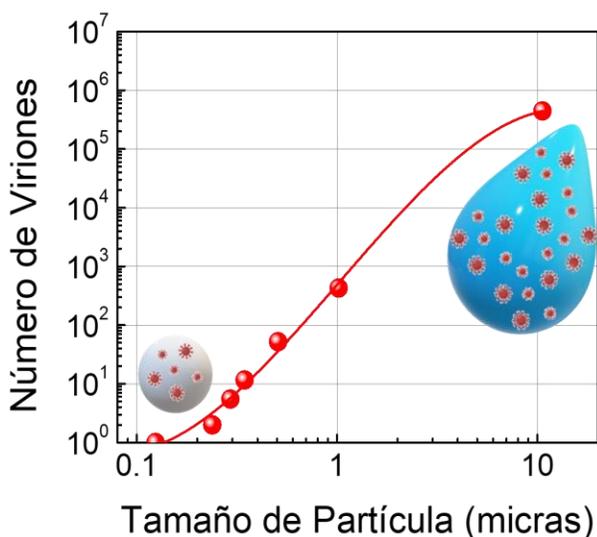


**Figura 5.** Eficiencia de filtrado del algodón según el número de capas adaptado de Bargheri y colaboradores [24]. El tricapa contiene 2 capas de algodón y una intermedia de polipropileno

En los cubrebocas de tela también se quedan atrapados los microorganismos, pero durante el lavado (con agua y jabón) pueden eliminarse fácilmente. El uso de agua caliente o cloro ayuda a una eliminación más efectiva. Una de sus grandes ventajas es que se disminuye el impacto al medio ambiente, reutilizando y reduciendo los residuos.

## Carga viral

Una posible explicación de la utilidad de los cubrebocas de tela o los quirúrgicos es que se ha visto que la gravedad de la enfermedad COVID-19 se acrecienta al aumentar la carga viral recibida, es decir, el número partículas virales (viriones). La figura 6 muestra el incremento en la cantidad de viriones con el tamaño de partículas; las partículas entre 1-10 micras contienen de miles a millones de viriones. Como se muestra en la figura 5, las eficiencias de filtrado para partículas mayores a 1 micra normalmente son superiores al 80 % cuando se utilizan en cubrebocas tricapa, mientras que los quirúrgicos para ese tamaño alcanzan el 98 % requerido por norma. Es decir, las partículas de mayor tamaño (con mayor carga viral) son eficientemente filtradas, tanto por los cubrebocas de tela como por los quirúrgicos, lo que coadyuva a evitar una enfermedad de mayor gravedad. Esto ha sido comprobado en estudios previos, donde se concluye que la eficiencia de filtrado a tamaños mayores parece ser de mayor relevancia a la hora de evitar infecciones virales [27-29]. El riesgo mayor lo constituyen las zonas de fuga, debido a un ajuste deficiente si el diseño o ajuste a la cara no es el adecuado.



**Figura 6.** Número de viriones contenidos en las gotas según el tamaño de estas

Para información más detallada se recomiendan dos trabajos: Zangmeister y cols. [30], del Laboratorio de Estándares y Medidas de USA, determinaron las eficiencias de filtración y la respirabilidad de respiradores y mascarillas quirúrgicas de diferentes textiles, tejidos y no tejidos, en capa simple y multicapas, aplicando el procedimiento de la norma de certificación NIOSH-N95. Mientras que Mueller y cols. [31], evaluaron el efecto del ajuste en la eficiencia de filtración para respiradores, mascarillas quirúrgicas y cubrebocas de tela con diferentes diseños (véase <https://www.masktestingatnu.com/>). Las conclusiones de estos trabajos y otros basados en revisiones es que, independientemente del tipo o ajuste, las mascarillas tienen un doble propósito, protegernos a nosotros mismos de una infección viral y proteger a los otros [32-36].

## Nanocapa SakCu®

En el número anterior (2021) de la Revista Materiales Avanzados (número 35) se describió el desarrollo de la nanocapa SakCu® compuesta de plata y cobre, con la capacidad de inactivar al virus SARS-CoV-2 y a un conjunto de bacterias multidrogoresistentes que son de origen hospitalario. Se mostró además que la nanocapa no es tóxica para las células constituyentes de la piel, por lo que se propuso utilizarla para la elaboración de equipos de protección personal (cubrebocas, mascarillas, respiradores, batas, pijamas quirúrgicos, etc.), necesarios como mecanismo de protección durante la pandemia, que ya se ha alargado por más de dos años consecutivos y amenaza con quedarse.

La nanocapa SakCu® podría ser utilizada como una medida extra de protección que evite la acumulación y proliferación de microorganismos sobre los sistemas de protección personal, además de reducir el riesgo de contaminación cruzada al quitarse y ponerse el cubrebocas, así como durante el desecho, en el caso de los equipos de un solo uso.

Sin embargo, además de las pruebas para demostrar la actividad antimicrobiana de la nanocapa y su inocuidad para las células humanas, hay otros aspectos de seguridad y funcionalidad que eran necesarios evaluar antes de su aplicación, los cuales se describen en el presente artículo.

Los aspectos de seguridad evaluados se refieren a determinar la adhesión de la nanocapa al material filtrante (polipropileno). Para llevar a cabo lo anterior se adaptaron dos experimentos: el primero consistió en asegurarnos de que, ante un flujo de aire, no existiera ningún tipo de desprendimiento de la plata o el cobre utilizados para la nanocapa, para que estos no fueran

respirados o ingeridos al usar el cubrebocas. El segundo de ellos fue determinar el grado de adhesión de la nanocapa utilizando una norma adaptada.

Estos resultados nos permitieron plantear el diseño de cubrebocas, mascarillas e incluso respiradores que de forma segura pudieran contener la nanocapa SakCu®. Por ejemplo, en colaboración con el consorcio establecido entre el Instituto de Ingeniería de la UNAM; la Secretaría de Ciencia, Tecnología, Educación e Innovación (SECTEI) de la CDMX, y la compañía ATFIL SA de CV se demostró como prueba piloto que la nanocapa podía integrarse a los respiradores tipo N95 producidos y comercializados por ATFIL (ATF-N95) [37].

Por otro lado, preocupados por la protección de un amplio sector de la población (no solo el sector médico) y a la vez proteger al medio ambiente de la gran cantidad de desechos plásticos, se decidió diseñar un cubrebocas lavable y reutilizable con la protección biocida de la nanocapa SakCu®.

El cubrebocas se diseñó siguiendo las recomendaciones propuestas por las agencias europeas y los resultados de mediciones de eficiencia de materiales de uso común que fueran de fácil acceso aun en condiciones de pandemia. La propuesta consiste en un cubrebocas tricapa: dos capas externas de algodón o mezclas de poliéster y algodón (polyalgodón, que tiene mejores propiedades de repelencia al agua) con una capa intermedia de polipropileno que lleva la nanocapa SakCu®. Como se describió anteriormente, dicho diseño debe cumplir con un cierto porcentaje de eficiencia al filtrado de partículas, baja resistencia al flujo del aire para asegurar la respirabilidad y un buen ajuste alrededor de la nariz y la boca.

A continuación, se describen las pruebas y los resultados obtenidos de adhesión de la nanocapa, la eficiencia de filtrado del cubrebocas, el ajuste del cubrebocas y la respirabilidad.

## Adhesión: Prueba de pelado

Lograr una alta adherencia entre cierta película y el sustrato que la soporta siempre será un punto clave para su aplicación exitosa. Las técnicas de medición de adhesión, tales como prueba de rayado (*scratch*) o de jalado (*pull-out*) están delineadas para sustratos rígidos, por lo que no son aplicables al caso de la nanocapa SakCu® aplicada en un textil sintético flexible y de alta porosidad. Entre las alternativas, adaptamos la norma ASTM F2256-05 (Standard Test Method for Strength Properties of Tissue Adhesives in T-Peel by Tension Loading), cuyo propósito es evaluar adhesivos en aplicaciones médicas.

Este método de ensayo tiene por objeto proporcionar un medio para comparar la “resistencia adhesiva” de diferentes adhesivos tisulares destinados a ser utilizados para fines quirúrgicos, selladores, o ambos, en tejidos blandos. Con la elección adecuada del sustrato, también puede utilizarse para fines de control de calidad en la fabricación de dispositivos médicos a base de adhesivos tisulares. Esta técnica fue adaptada para determinar la fuerza necesaria para desprender la nanocapa del polipropileno o, en su caso, la falla del polipropileno sin desprendimiento de la nanocapa. Se emplearon diferentes cintas adhesivas comerciales para este estudio (*Masking Tape*, cinta canela y cinta gris reforzada multiusos). La prueba consistió en cortar tiras de  $2.5 \pm 0.1$  cm  $\times$   $15 \pm 0.2$  cm, tanto del polipropileno como de la cinta adhesiva de prueba, y posteriormente adherirlas entre sí aplicando un peso de 12 kg por 24 h sobre el área adherida. La técnica fue realizada en una máquina con mordazas neumáticas en donde se aseguró la muestra formando una T, como se muestra en la figura 7. Posteriormente, se aplicó una fuerza para separar la cinta adhesiva de la nanocapa de platocobre, con una velocidad de 250 mm/minuto hasta la falla del polipropileno o el desprendimiento total del sistema.

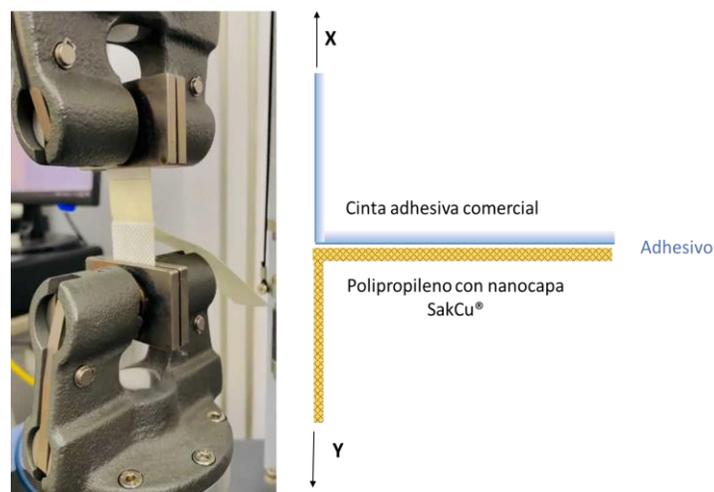


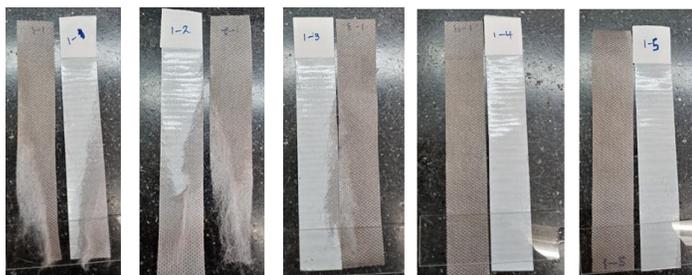
Figura 7. Esquema de la forma en que se mide la fuerza de adhesión

Lo que se mide de esta forma es la fuerza con la que el adhesivo de la cinta comercial se adhiere al polipropileno con la nanocapa, los valores obtenidos se reportan en la tabla 2, donde puede observarse que la cinta gris reforzada multiusos es la que se adhiere con mayor fuerza. Para observar si la nanocapa fallaba analizamos cualitativamente, para cada fuerza adhesiva y para diferentes cintas, si la nanocapa resultaba desprendida antes de que lo hiciera la fibra del polipropileno. Los resultados pueden observarse en la figura 8.

**Tabla 2.** Fuerza de adhesión promedio del polipropileno con nanocapa SakCu® con tres cintas comerciales diferentes

	Masking Tape	Cinta canela	Cinta gris reforzada multiusos
<b>Fuerza adhesiva promedio cinta-polipropileno sin recubrir</b>	$5.39 \pm 1.57$ N	$0.987 \pm 0.18$ N	$6.29 \pm 0.55$ N

La figura 8 muestra las cinco pruebas realizadas con la cinta gris, donde el estudio cualitativo de las zonas de rompimiento (utilizando microscopía óptica) permitió determinar que se desprenden primero las fibras del polipropileno, sugiriendo fallas cohesivas, antes de que pueda observarse que la nanocapa de plata-cobre sea desprendida del polipropileno.

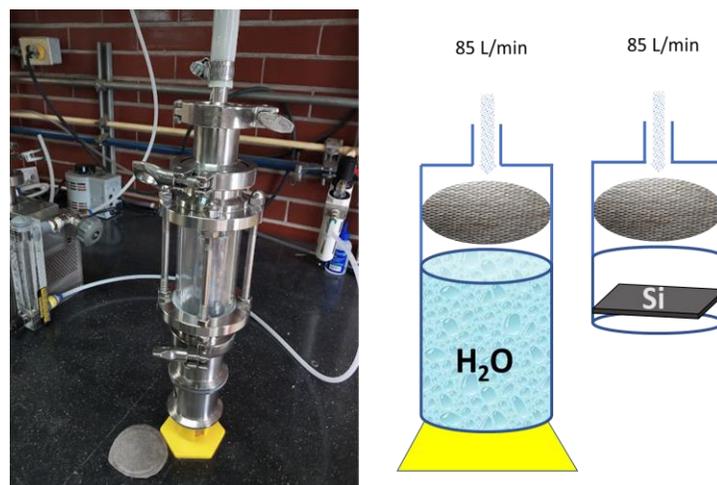


**Figura 8.** El análisis microscópico de las fibras desprendidas mostraba que la nanocapa se mantiene unida a la fibra polimérica

## Adhesión: Desprendimiento por flujo de aire

Una segunda prueba de adhesión se realizó sometiendo la nanocapa depositada sobre el polipropileno a un flujo de aire de 85 L/min por hasta 72 horas. El objetivo de la prueba era detectar un posible desprendimiento de trozos no visibles de la nanocapa de plata-cobre o incluso algún desprendimiento atómico-iónico. La figura 9 muestra una fotografía del sistema y dos esquemas. El primero donde el material desprendido era recolectado en un recipiente con agua desionizada para un análisis posterior, haciendo uso de la técnica de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (conocida como ICP-MS por sus siglas en inglés). El ICP-MS permite detectar el contenido de partes por millón y partes por billón de impurezas metálicas en disolución. En nuestro caso, nos permitió determinar, incluso, si hubo desprendimiento de pequeñas partículas no disueltas, pues se realizó un proceso de digestión ácida en un horno de microondas (Multiwave Go,

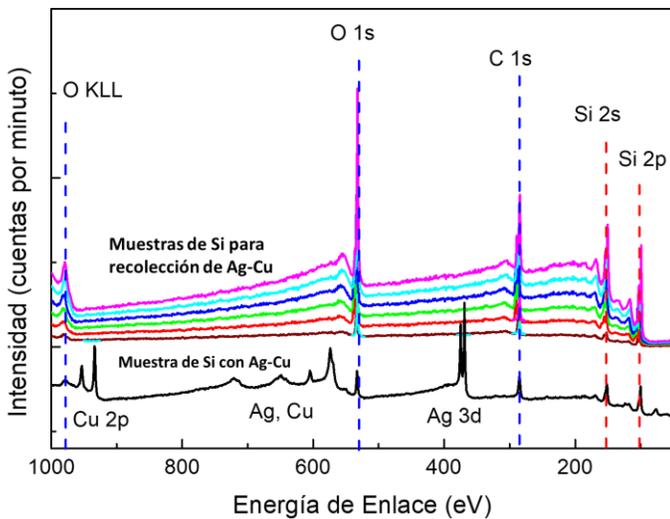
Anton Paar) con ácido nítrico ultrapuro al 70 % de Sigma Aldich (99.999 %) y agua ultrapura tipo I ( $18.2 \text{ M}\Omega\text{cm}^{-1}$ ) producida en el sistema de purificación de agua (GenPure Pro UV, Thermo Scientific). Con este procedimiento se solubilizó cualquier pequeña partícula metálica existente. En el segundo esquema se colocaba una pieza de Si cristalino, el cual fue estudiado antes y después del experimento utilizando espectroscopía de fotoelectrones (XPS). La técnica de XPS detecta los elementos atómicos que se encuentren en las superficies (los 10 nm superficiales), por lo que se esperaba poder detectar cualquier cantidad minúscula de la nanocapa que quedara adherida al silicio.



**Figura 9.** Fotografía y esquema del método de medición de la resistencia al flujo de aire

Las mediciones de ICP-MS fueron repetidas en cuatro ocasiones y cada una de las muestras acuosas se midió por triplicado, obteniéndose resultados negativos en todas ellas. Es decir, al nivel de partes por millón no se detectaron ni plata ni cobre en el agua.

La figura 10 presenta espectros de seis piezas de Si medidas después del experimento y un ejemplo de depósitos de plata y cobre sobre silicio. El espectro de referencia Ag-Cu sobre silicio se obtuvo depositando una capa de plata-cobre que fue erosionada con iones de argón hasta llegar al sustrato, por lo que se observan las señales de fotoemisión de ambos metales y del silicio. En el caso de las seis muestras experimentales, puede observarse que se detectan solamente el Si, O y C. Los dos primeros elementos correspondientes al óxido nativo ( $\text{SiO}_2$ ) y el carbono adsorbido en la superficie, debido a que las muestras estuvieron expuestas al medio ambiente. La comparación entre estos espectros indica que no hay plata ni cobre en la superficie del Si.



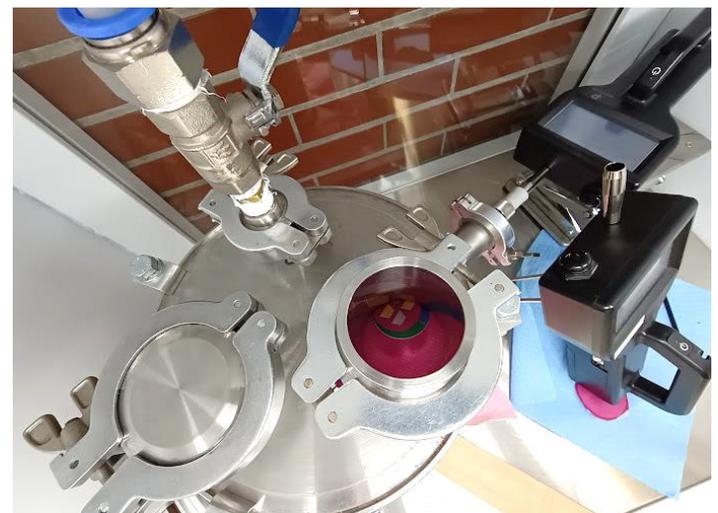
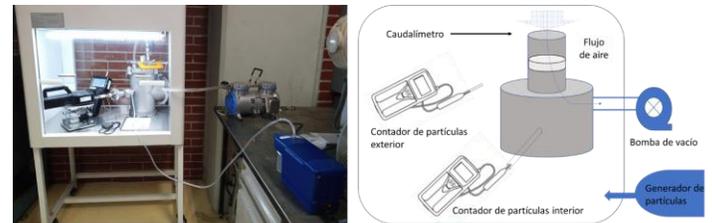
**Figura 10.** Espectros de composición superficial obtenidos con la técnica de espectroscopía de fotoelectrones de seis experimentos, comparando con lo que se esperaba encontrar en caso de un desprendimiento.

**Eficiencia de Filtrado**

La Norma Oficial Mexicana NOM-116-STPS-2009, Seguridad-Equipo de protección personal-Respiradores purificadores de aire de presión negativa contra partículas nocivas- especifica la metodología a utilizar para la medición de la eficiencia de filtrado. El objetivo es clasificar a los respiradores purificadores de aire de presión negativa contra partículas nocivas presentes en el ambiente laboral. Están diseñados para usarse como protección respiratoria en atmósferas con partículas contaminantes, tales como polvos, humos y neblinas, que no son inmediatamente peligrosos para la vida o la salud, y que contienen el oxígeno adecuado para mantener la vida. De acuerdo con el porcentaje alcanzado de filtración se identifican como 90, 95 o 100 y clase N para ambientes libres de aceite, clase R para cualquier partícula, incluyendo aceites con límite de 8 horas de uso y clase P para cualquier partícula cuyo límite de tiempo de uso está definido por su saturación.

El sistema debe contener: generador de aerosoles (cloruro de sodio o parafina), neutralizador, calentador de aerosol, mezclador, medidor de flujo, soporte de filtro, transductor de presión y dos fotómetros. Debido a las restricciones presupuestales, el equipo desarrollado en el instituto no contiene neutralizador ni calentador, y el flujo de partículas de NaCl generado por un generador comercial (*TSI 8026 particle generator*) es mezclado en el espacio definido por una cámara de flujo laminar con el aire. El dispositivo funciona filtrando el aire a una velocidad impuesta por el sistema de bombeo (Roker

400), cuya velocidad de flujo en el sitio donde se coloca el material es de 90 cm/s (medido con Testo 405i Thermal anemometer); muy superior a lo que manda la norma NIOSH, 2007, de 5.3 cm/s, pero dentro del intervalo medido en otros trabajos [38-40]. figura 11.



**Figura 11.** Fotografía del sistema completo y esquema. Fotografía mostrando el sistema tricapa del cubrebocas SakCu® montado en el sistema para las mediciones

La eficiencia de filtrado para cada tamaño de partículas fue estimada como:

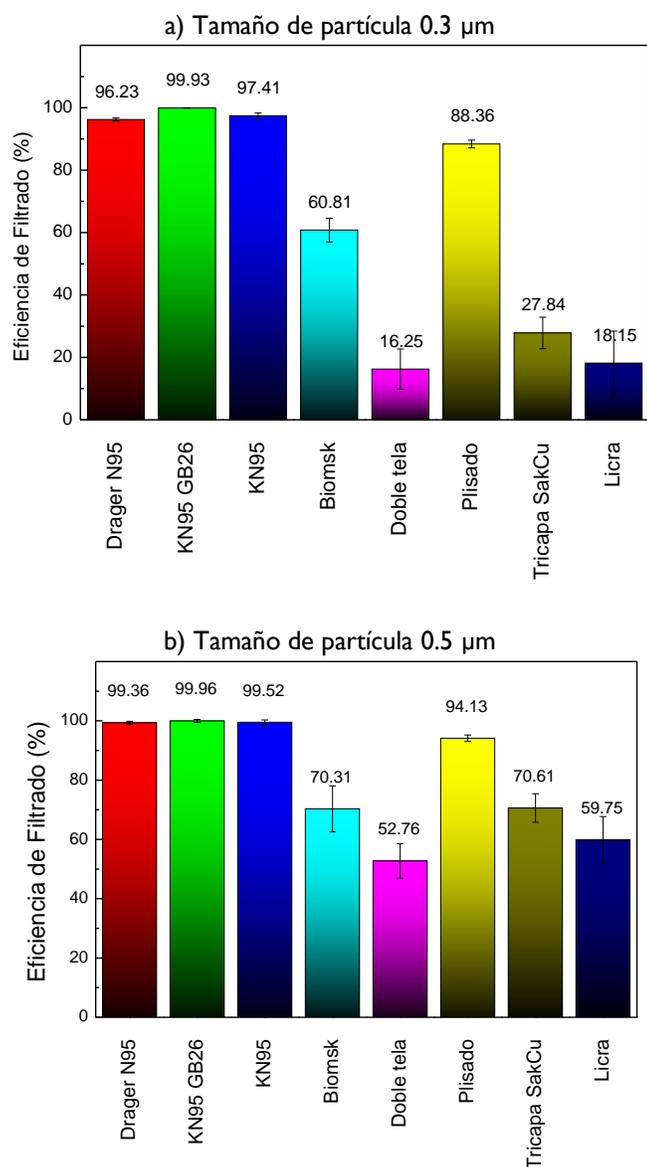
$$EF (\%) = \frac{Partículas Exterior - Partículas Interior}{Partículas Exterior} \times 100 \quad (1)$$

Los contadores de partículas tienen tres canales, lo que significa que de forma simultánea pueden cuantificar las partículas en tres intervalos de tamaño. Están calibrados para mediciones de 0.3, 0.5, 1.0, 2.5 y 5.0 micrómetros.

El sistema completo y la metodología específica de medición fue validado midiendo la eficiencia de filtrado de respiradores comerciales con certificado (N95 o KN95). Cabe mencionar que, para definir la metodología, se siguieron lineamientos de la norma ASTM F2299, la cual define las condiciones de calibrado de ambos contadores, número de muestras, el número mínimo de partículas por tamaño, etc.

Las mediciones se realizaron por triplicado, cortando círculos de 8.85 cm<sup>2</sup> a partir de cada cubreboca o mascarilla, y para cada muestra se tomaron cinco mediciones.

La figura 12 compara la eficiencia de filtrado (estimada con la ecuación 1) del cubrebocas de tela tricapa con la nanocapa SakCu® con los siguientes equipos: un respirador de alta eficiencia (Drager X-plor 1350 N95), un respirador KN95 certificado (Norma GB2626-2006 Fujian Shane Textile Co Ltd), un KN95 no certificado, la mascarilla comercial con nanomolécula Nbelyax® Biomsk (Providencia healthcare line), un cubrebocas de doble capa de tela sin marca, un cubrebocas quirúrgico plisado (UniMask American healthcare products) y otro de licra sin marca.



**Figura 12.** Eficiencias de filtrado en función del tamaño de partícula para diferentes modelos de respiradores y cubrebocas. La figura 12a muestra que, efectivamente, el tamaño de partícula más difícil de filtrar es el de 0.3 μm, valor donde se notan las mayores diferencias entre los cubrebocas, mascarillas y respiradores. La eficiencia estimada aumenta al aumentar el tamaño de partículas (Fig. 12b y 12c), lo que asegura que las gotas de mayor volumen (mayor contenido de viriones) son detenidos por la mayoría de los modelos. Los tamaños superiores a 2.5 y 5.0 μm no se reportan, porque la cantidad de partículas de dichos tamaños no supera los mínimos definidos en la norma ASTM F2299 para el cálculo de las eficiencias.

Cabe mencionar que las eficiencias de filtrado aumentan al disminuir la velocidad del flujo, que en este experimento es superior a lo estipulado por las normas (y simula una respiración acelerada o agitada, en lugar de la normal) [38, 39].

### Ajuste

La figura 13 reporta la eficiencia de filtrado medida utilizando un equipo TSI para la calibración del ajuste de los respiradores (TSI PortaCount Plus Respirator Fit Tester & N95- Companion Module model 8095). En este caso, se cuantifican las partículas dentro y fuera del respirador cuando el usuario lo tiene colocado [41]. Es un sistema comercial utilizado para demostrar la eficiencia en el sitio de trabajo y dar entrenamiento a los usuarios sobre la forma correcta de colocar el respirador. El equipo fue prestado por la compañía Dräger Safety México SA de CV y, si bien la norma de medición determina siete parámetros diferentes que deben cumplir los respiradores para tener una evaluación positiva, nosotros solo reportamos las dos primeras mediciones que se refieren a

pruebas con respiración normal y profunda. El tamaño de partícula medido por el sistema TSI es de 0.3  $\mu\text{m}$ . Para los respiradores colocados de forma adecuada, la eficiencia es siempre superior al 95 %. Sin embargo, en las mascarillas y cubrebocas que no se ajustan de forma hermética a la cara, las partículas pueden penetrar por diferentes zonas (figura 13). Para el cubrebocas tricapa SakCu® puede observarse que el modelo seleccionado y el sistema de ajustes colocados en los resortes permite alcanzar eficiencias alrededor del 60 %, superior a las mascarillas quirúrgicas plisadas. Los valores reportados para la mascarilla quirúrgica, de  $38.3 \pm 4.0$  %, coinciden con las mediciones reportadas por Clapp y cols. [42] de  $38.5 \pm 11.2$  % cuando se detiene en el pabellón de las orejas. Los autores [42] demuestran diferentes estrategias para mejorar dicho ajuste a la cara, entrecruzando los resortes o ajustándolos detrás de la cabeza, y puede así aumentarse hasta un  $60.3 \pm 11.1$  %. Lo anterior demuestra la importancia del ajuste, y estas tácticas podrían aplicarse en cualquier otro modelo de cubrebocas.

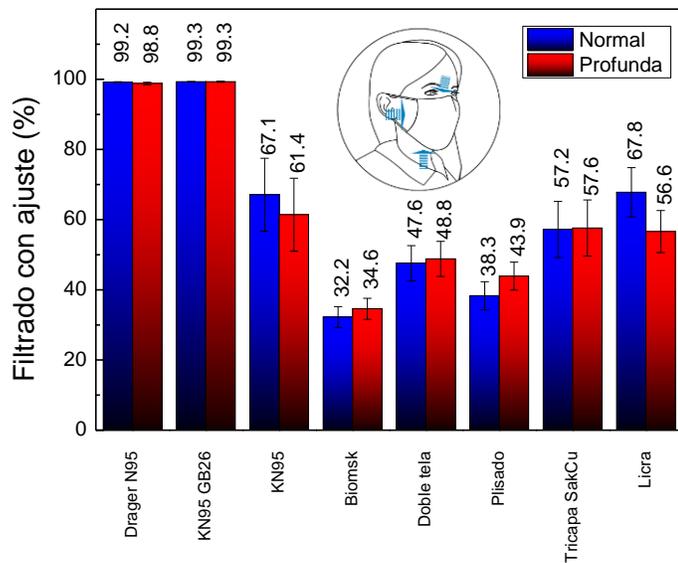


Figura 13. Eficiencias de filtrado considerando el ajuste de todo el cubrebocas

### Respirabilidad

Finalmente, el otro punto importante definido por las normas es la respirabilidad, la cual se determina midiendo el diferencial de presión causado por el cubrebocas, mascarilla o respirador al inhalar y exhalar. En este caso, no nos fue posible evaluar el diferencial de presión utilizando la mascarilla completa, sino tomando muestras circulares de 4.9  $\text{cm}^2$ . Las normas definen diferenciales de presión no superiores a 60 Pa/cm<sup>2</sup> cuando se considera toda el área del respirador. Dado que nosotros solo

determinamos el diferencial de presión causado por un área circular mucho menor, no se pueden comparar los valores absolutos medidos con los límites de las normas, por lo que establecemos como un máximo aceptable los valores obtenidos para los respiradores Dräger y KN95 certificados.

La medición se realizó haciendo pasar un flujo de aire filtrado a 85 L/min a través de un área de 4.9  $\text{cm}^2$ , recortada de los respiradores o mascarillas, y midiendo el diferencial de presión con un equipo Testo 510 (Differential Pressure Probe).

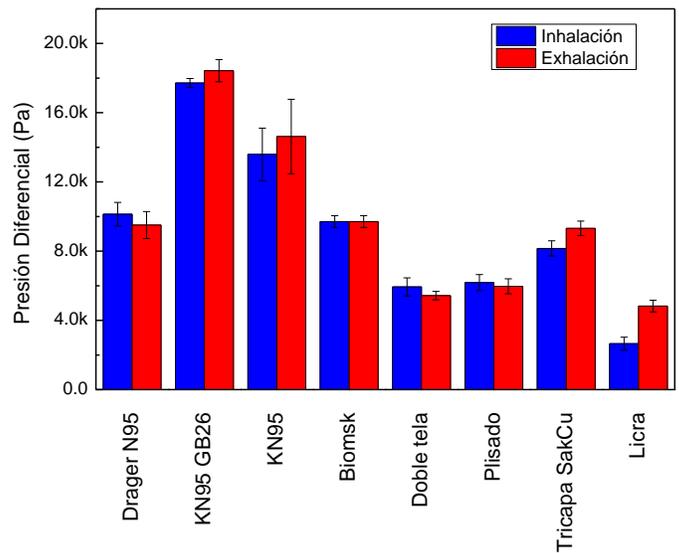
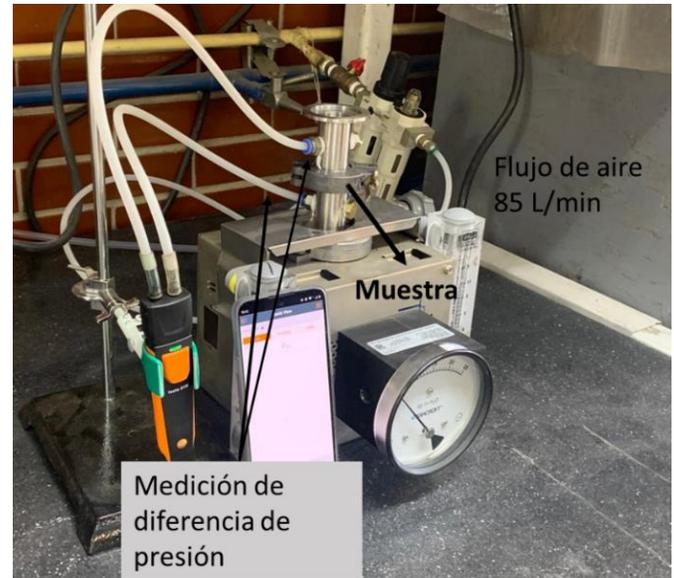


Figura 14. Medición del diferencial de presión al pasar aire a través de las capas que conforman a un cubrebocas o respirador

Un valor menor de diferencial de presión significa que el aire, al ser inhalado o exhalado, puede fluir a través de las capas, asegurándose de que estas hagan su labor de atrapamiento de

las diferentes partículas. Valores muy altos requieren que el sellado del cubrebocas sea muy eficiente, de otra forma el aire tiende a pasar por los orificios (sin ningún filtrado) en lugar de pasar a través de las capas. Puede verse que los cubrebocas KN95, con y sin certificado, son los que ofrecen un valor superior, por lo que deben utilizarse de forma adecuada, sellándose alrededor de nariz y mentón para evitar el flujo de aire por los bordes. Sin embargo, el valor superior también indica una mayor dificultad al momento de respirar. Esto compromete su uso adecuado, puesto que el usuario tiende a quitárselo. El cubrebocas de tela SakCu® tricapa ofrece una resistencia al flujo de aire superior a los otros cubrebocas de tela o plisados, pero no superior a los respiradores. Es importante mencionar que solamente cuando medimos el diferencial de presión para combinaciones de dos tipos de sistemas de protección (plisado + tela o plisado + KN95) se obtuvieron valores superiores a los del KN95, lo que es una indicación de que el uso de doble cubrebocas puede no ser recomendable.

## Resumen

La pandemia nos ha obligado a aprender temas que hace más de dos años eran desconocidos. Fue la necesidad de buscar soluciones que apoyaran la lucha contra las infecciones de COVID-19 lo que nos llevó a aplicar nuestros conocimientos de física y ciencia e ingeniería de materiales hacia aspectos diferentes a los de nuestras líneas de investigación previas a la pandemia. Este artículo (y el anterior, de la narrativa sobre la nanocapa de plata y cobre SakCu® aplicada al desarrollo de un cubrebocas) resume las diferentes acciones realizadas. Nos enfrentamos a temáticas fuera de nuestro campo de especialidad, pero que consideramos que son críticas para tener una evaluación del funcionamiento y la seguridad del cubrebocas diseñado.

A la fecha pueden encontrarse en la literatura muchas propuestas de cubrebocas con actividad biocida [43-47] similares a las demostradas para la nanocapa SakCu®, lo cual nos indica que la propuesta e investigación realizadas por nosotros estuvieron en la dirección correcta. El cubrebocas de tela reutilizable con la nanocapa SakCu® (que ahora está disponible en Tienda UNAM) brinda una protección adicional en comparación con otros cubrebocas de tela, por su triple capa y por su actividad biocida. Además, brinda un grado de confort que permite que se use por periodos prolongados. El nivel de filtración demostrado es intermedio (~ 70 % para partículas desde 0.5  $\mu\text{m}$  y superior al 70 % para partículas de

mayor tamaño), por lo que no es necesariamente adecuado para el personal médico en contacto con pacientes, pero sí lo es para el público en general.

Al tratarse de una mascarilla reutilizable, esta ayuda a disminuir la gran contaminación generada por desechos plásticos que creció exponencialmente durante la pandemia. En un futuro inmediato visualizamos que la nanocapa SakCu®, aplicada sobre mascarillas quirúrgicas, brindará una solución atractiva para proteger al personal médico (e incluso a pacientes) de las infecciones hospitalarias causadas por las bacterias resistentes a los antibióticos, que actualmente significan un gran riesgo a la salud. Sumado a lo anterior, el nivel de filtración de esta mascarilla es perfectamente adecuado para los altos niveles de contaminación ambiental que sufrimos día a día en la Ciudad de México y demás centros urbanos, puesto que tiene un enorme poder filtrante (el número de partículas se ve reducido por debajo del límite de detección del contador de partículas, lo que indica una filtración cercana al 100 %). Es capaz de filtrar partículas con tamaños iguales o superiores a 2.5  $\mu\text{m}$  (las llamadas PM2.5, PM5 y PM10), con la ventaja adicional de que no habrá crecimiento bacteriano en su superficie.

**Agradecimientos:** Proyecto financiado por SECTEI 096/2020. Se agradece a todo el personal administrativo de confianza del IIM, quienes destinaron parte de su valioso tiempo para empaquetar cubrebocas de forma manual, y así poder hacerlos llegar a nuestros compañeros y demás personal de la UNAM durante los difíciles tiempos del 2021. Un agradecimiento especial a la Dra. Rocío de la Torre, por la gestión para el registro de la marca, patente, convenios, etc.

## Referencias

- [1] M.H. Chua, W. Cheng, S.S. Goh, J. Kong, B. Li, J.Y.C. Lim, L. Mao, S. Wang, K. Xue, L. Yang, E. Ye, K. Zhang, W.C.D. Cheong, B.H. Tan, Z. Li, B.H. Tan, X.J. Loh, *Research*, 2020 (2020) 7286735.
- [2] P. Forouzandeh, K. O'Dowd, S.C. Pillai, *Safety Science*, 133 (2021) 104995.
- [3] S.E. Eikenberry, M. Mancuso, E. Iboi, T. Phan, K. Eikenberry, Y. Kuang, E. Kostelich, A.B. Gumel, *Infect Dis Model*, 5 (2020) 293-308.
- [4] T. Greenhalgh, J.L. Jimenez, K.A. Prather, Z. Tufekci, D. Fisman, R. Schooley, *The Lancet*, 397 (2021) 1603-1605.
- [5] S.-A. Tabatabaeizadeh, *European Journal of Medical Research*, 26 (2021).

- [6] R. Zhang, Y. Li, A.L. Zhang, Y. Wang, M.J. Molina, Proceedings of the National Academy of Sciences, 117 (2020) 14857-14863.
- [7] J. Sills, K.A. Prather, L.C. Marr, R.T. Schooley, M.A. McDiarmid, M.E. Wilson, D.K. Milton, Science, 370 (2020) 303-304.
- [8] CDC, <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/sars-cov-2-transmission.html>, 2021.
- [9] Organización Mundial de la Salud, <https://www.who.int/es/activities/tracking-SARS-CoV-2-variants>, 2022.
- [10] G.L. Lluch, in, BBC, BBC noticias, 2021.
- [11] Y. Liu, J. Rocklöv, J Travel Med, (2022).
- [12] E. Mostafavi, A.K. Dubey, L. Teodori, S. Ramakrishna, A. Kaushik, MedComm (2020), 3 (2022) e119.
- [13] C.Y.H. Chao, M.P. Wan, L. Morawska, G.R. Johnson, Z.D. Ristovski, M. Hargreaves, K. Mengersen, S. Corbett, Y. Li, X. Xie, D. Katoshevski, Journal of Aerosol Science, 40 (2009) 122-133.
- [14] S. Asadi, A.S. Wexler, C.D. Cappa, S. Barreda, N.M. Bouvier, W.D. Ristenpart, Scientific Reports, 9 (2019) 2348.
- [15] V. Stadnytskyi, E. Bax Christina, A. Bax, P. Anfinrud, Proceedings of the National Academy of Sciences, 117 (2020) 11875-11877.
- [16] W. Chen, N. Zhang, J. Wei, H.-L. Yen, Y. Li, Building and Environment, 176 (2020) 106859.
- [17] K.A. Prather, C.C. Wang, R.T. Schooley, Science, 368 (2020) 1422-1424.
- [18] J. Gralton, E. Tovey, M.-L. McLaws, W.D. Rawlinson, Journal of Infection, 62 (2011) 1-13.
- [19] C.C. Wang, K.A. Prather, J. Sznitman, J.L. Jimenez, S.S. Lakdawala, Z. Tufekci, L.C. Marr, Science, 373 (2021) eabd9149.
- [20] D.K. Milton, Journal of the Pediatric Infectious Diseases Society, 9 (2020) 413-415.
- [21] A. Tcharkhtchi, N. Abbasnezhad, M. Zarbini Seydani, N. Zarak, S. Farzaneh, M. Shirinbayan, Bioactive Materials, 6 (2021) 106-122.
- [22] K.W. Lee, B.Y.H. Liu, Journal of the Air Pollution Control Association, 30 (1980) 377-381.
- [23] S.B. Kasloff, A. Leung, J.E. Strong, D. Funk, T. Cutts, Scientific Reports, 11 (2021) 984.
- [24] M. H. Bagheri, I. Khalaji, A. Azizi, R. Loibl, S. Manzo, M. Gorrepati, S. Mehendale, C. Mohr, S. Schifres, Filtration Efficiency, Breathability, and Reusability of Improvised Materials for Face Masks, 2020.
- [25] J.M. Courtney, A. Bax, Biophysical Journal, 120 (2021) 994-1000.
- [26] O. Aydin, B. Emon, S. Cheng, L. Hong, L.P. Chamorro, M.T.A. Saif, Extreme Mechanics Letters, 40 (2020) 100924.
- [27] Z. Zuo, T.H. Kuehn, D.Y.H. Pui, The Annals of Occupational Hygiene, 59 (2015) 812-816.
- [28] B. Damit, B.L. Bischoff, T.J. Phelps, C.-Y. Wu, M.-D. Cheng, Journal of Environmental Engineering, 140 (2014) 06014007.
- [29] M.-H. Woo, Y.-M. Hsu, C.-Y. Wu, B. Heimbuch, J. Wander, Journal of aerosol science, 41 (2010) 944-952.
- [30] C.D. Zangmeister, J.G. Radney, E.P. Vicenzi, J.L. Weaver, ACS Nano, 14 (2020) 9188-9200.
- [31] A.V. Mueller, M.J. Eden, J.M. Oakes, C. Bellini, L.A. Fernandez, Matter, 3 (2020) 950-962.
- [32] M. Abboah-Offei, Y. Salifu, B. Adewale, J. Bayuo, R. Ofosu-Poku, E.B.A. Opare-Lokko, Int J Nurs Stud Adv, 3 (2021) 100013.
- [33] S. Lopez Leon, C. Ayuzo, C. Perelman, R. Sepulveda, I.J. Colunga-Pedraza, A. Cuapio, T. Wegman-Ostrosky, SciELO Preprints, (2020).
- [34] S. Beesoon, N. Behary, A. Perwuelz, Prev Med, 139 (2020) 106236.
- [35] R.-G.J. Alfonso, Medicina Interna de Mexico, 37 (2021) 94-109.
- [36] J. Howard, A. Huang, Z. Li, Z. Tufekci, V. Zdimal, H.-M.v.d. Westhuizen, A.v. Delft, A. Price, L. Fridman, L.-H. Tang, V. Tang, G.L. Watson, C.E. Bax, R. Shaikh, F. Questier, D. Hernandez, L.F. Chu, C.M. Ramirez, A.W. Rimoin, Proceedings of the National Academy of Sciences, 118 (2021) e2014564118.
- [37] ATFIL SA de CV, <https://www.atfilmascarillas.com.mx/>
- [38] W. Hao, A. Parasch, S. Williams, J. Li, H. Ma, J. Burken, Y. Wang, Int J Hyg Environ Health, 229 (2020) 113582.
- [39] E. Kelly, S. Pirog, J. Ward, P.J. Clarkson, BMJ Open, 10 (2020) e039424.
- [40] A. Konda, A. Prakash, G.A. Moss, M. Schmoltdt, G.D. Grant, S. Guha, ACS Nano, (2020).
- [41] C.C. Coffey, R.B. Lawrence, Z. Zhuang, D.L. Campbell, P.A. Jensen, W.R. Myers, Applied Occupational and Environmental Hygiene, 17 (2002) 723-730.
- [42] P.W. Clapp, E.E. Sickbert-Bennett, J.M. Samet, J. Berntsen, K.L. Zeman, D.J. Anderson, D.J. Weber, W.D. Bennett, U.C.f.D. Control, P.E. Program, JAMA Internal Medicine, 181 (2021) 463-469.
- [43] S. Kumar, M. Karmacharya, S.R. Joshi, O. Gulenko, J. Park, G.-H. Kim, Y.-K. Cho, Nano Letters, 21 (2021) 337-343.
- [44] S. Kumaran, E. Oh, S. Han, H.-J. Choi, Nano Letters, 21 (2021) 5422-5429.
- [45] M. Karmacharya, S. Kumar, O. Gulenko, Y.-K. Cho, ACS Applied Bio Materials, 4 (2021) 3891-3908.
- [46] A. Tuñón-Molina, K. Takayama, E.M. Redwan, V.N. Uversky, J. Andrés, Á. Serrano-Aroca, ACS Applied Materials & Interfaces, 13 (2021) 56725-56751.
- [47] H. Shen, M. Han, Y. Shen, D. Shuai, ACS Environmental Au, (2022).

# Thomas Harriot

## y

# Simon Stevin

José Luis Álvarez García

Departamento de Física, Facultad de Ciencias,  
Universidad Nacional Autónoma de México,  
Coyoacán 04510, Ciudad de México, México

[josel.alvarezgarcia@gmail.com](mailto:josel.alvarezgarcia@gmail.com)

## Resumen

En la Revolución Científica de los siglos XVI y XVII participaron un gran número de personajes, mostrando que la empresa científica es una actividad social fundamentalmente colectiva. Además de los grandes protagonistas de este periodo de la historia de la ciencia, también están figuras como las de Thomas Harriot y Simón Stevin, cuyo trabajo ayudó a que fructificara esta revolución.

## Introducción

La Revolución Científica de los siglos XVI y XVII es uno de los periodos cruciales en la historia de la ciencia. Como resultado de este proceso se sustituyó el modelo cosmológico geocéntrico por el heliocéntrico; la física aristotélica fue sustituida por la física galileana, que más tarde alcanzará su culminación con la gran síntesis de la física newtoniana. Además, el espacio físico (cualquier cosa que esto sea) fue sustituido por el espacio euclidiano. Se construyó el principio de la inercia, los cuerpos físicos fueron sustituidos por los objetos geométricos. Se cumplió de manera total el sueño pitagórico de encontrar regularidades matemáticas en la naturaleza; sueño que había sido continuado por Platón y Arquímedes, interrumpido por la filosofía aristotélica de no mezclar los géneros de las matemáticas y la física.

En esta revolución, que es el resultado de siglos de desarrollo del conocimiento, y que muestra que la empresa científica es una actividad social eminentemente colectiva, intervinieron muchos personajes. Están, desde luego, las figuras prominentes de Copérnico, Kepler, Tycho, Galileo, Descartes y Newton (Fig. 1); pero también están un gran número de personajes, que aun cuando su nombre no aparezca junto al de estos últimos, ayudaron y colaboraron para que esta revolución fructificara. Entre estos personajes se encuentran el inglés Thomas Harriot y el holandés Simón Stevin.



Figura 1. Copérnico, Tycho Brahe, Galileo, Descartes, Newton y Kepler

## Thomas Harriot

Matemático y astrónomo inglés (Fig. 2). Nació en 1560, en la ciudad de Oxford y murió en Londres en 1621. Realizó trabajos de geógrafo, y en el álgebra, junto con Vieta, introdujo el uso de símbolos literales para representar cantidades conocidas y desconocidas. Sin embargo, su álgebra tenía un alcance limitado, sobre todo porque aún no se desarrollaban completamente los números reales. Harriot fue uno de los primeros algebristas que colocó un número negativo en una ecuación, pero no aceptaba las raíces negativas y “demostró” que tales raíces eran imposibles. Fue él quien introdujo los símbolos matemáticos < (“menor que”) y > (“mayor que”). Su trabajo en matemáticas está expresado en el libro *Artis Analyticae Praxis*, que fue publicado en 1631. Contemporáneo de Galileo, realizó importantes trabajos en física y astronomía. Utilizando un telescopio fabricado por él mismo, fue el primer cartógrafo de la Luna (Fig. 3) y, al parecer, fue también el primero en observar las manchas solares a través de dicho aparato (lo anterior, unos meses antes que el físico italiano, pero sin haber publicado dicho descubrimiento).



Figura 2. Thomas Harriot

A principios del siglo XVII (tres años antes, por lo menos, de las investigaciones hechas por Galileo en torno al fenómeno de la caída libre) Thomas Harriot emprendió una serie de experimentos para estimar el tiempo de caída de los cuerpos a través del aire. Uno de los problemas que se planteó a sí mismo en su libro *Manuscritos Añadidos* es respecto a si debe considerarse que el grado de movimiento (la velocidad) es proporcional al espacio atravesado o al tiempo transcurrido. Esta cuestión la abordó Galileo en sus investigaciones. Se ignora la influencia entre Harriot y Galileo, pero este problema representaba una dificultad esencial dentro del ambiente en el que se discutía la física.

Otros pensadores interesados en el problema de la caída de los cuerpos (como Leonardo da Vinci, René Descartes y algunos otros) también proponían que, en dicho fenómeno, el grado de movimiento (la velocidad) era proporcional al espacio recorrido. El mismo Galileo, antes de encontrar su ley de la caída libre (en la cual la velocidad es proporcional al tiempo), también proponía la relación errónea entre la velocidad y el espacio recorrido.

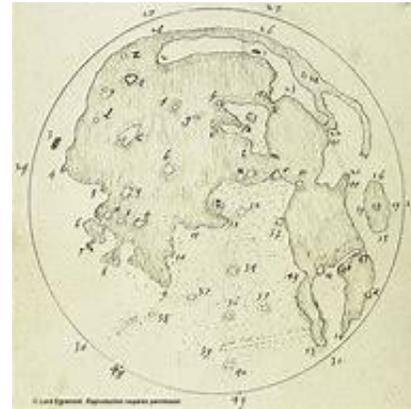


Figura 3. Cartografía lunar hecha por Harriot

En su libro, Harriot menciona el experimento de la caída de los cuerpos, consignándolo de manera sobria y algo obscura:

*“La bola cae de 55 ½ pies [de altura en] 2 ½ pulsaciones... [El experimento] fue ensayado con 20 balas, una [cayendo] después de la otra.”*

Lo que en realidad hizo Harriot fue un promedio de los tiempos empleados por veinte balas del mismo peso liberadas sucesivamente. Él le indicaba a un ayudante, situado en lo alto de una torre, el momento preciso para soltar la bala; entonces iniciaba a contar el número de pulsaciones de su muñeca hasta el momento en el que la bala hiciese contacto con el suelo. Cuando esto sucedía, su colaborador soltaba otra, al tiempo que Harriot se aprestaba a contar una nueva serie de pulsaciones desde el instante de impacto con el suelo de la bola anterior. El método es en principio bueno, porque permite establecer (de una manera aproximada) un criterio válido para definir una *duración igual de tiempo*. Sin embargo, exige mucha concentración iniciar (o finalizar) el conteo en los *instantes precisos*. Por otra parte, el método no es muy confiable en cuanto a la duración de las pulsaciones. Es lógico que el *reloj* de Harriot no fuese lo suficientemente preciso, logrando contar solamente pulsaciones enteras. Pese a ello, este autor es consecuente: estima el tiempo de caída del grave efectuando un promedio entre 3 y 2 ½ pulsos.

Si ahora nosotros utilizamos la relación que obtuvo Galileo, aproximadamente por los mismos años, en la que establece que la distancia recorrida es proporcional al cuadrado de los tiempos, podemos obtener un valor para la aceleración de la gravedad  $g$ . Como el *pulso* de Harriot equivale a 0.74 s y el pie utilizado es el inglés, que es igual a 30.5 cm, los valores extremos de  $g$  que podemos calcular resultan ser de 686.93 y 989.20  $\text{cm/s}^2$ ; y, en promedio, de 838.10  $\text{cm/s}^2$ . Valor muy bueno para la época (en la que muchos otros pensadores realizaron experimentos para hallar el valor de  $g$ ).

En esta época se construyó la nueva física que sustituiría a la física de Aristóteles. Si bien Thomas Harriot hizo algunos experimentos y descubrimientos en física y astronomía poco antes que Galileo Galilei, su física seguía siendo aristotélica. Por ejemplo, consideraba que la trayectoria de los proyectiles al inicio era una línea recta, mientras conservaban el *impetus* impregnado por el cañón, para después continuar con un semicírculo, que era la trayectoria natural perfecta que seguían los cuerpos en la naturaleza, para finalizar en una línea recta dirigida hacia el centro de la Tierra, debido a que predominaba la propiedad de pesantez que poseían todos los cuerpos graves de manera natural (Fig. 4). Galileo, por el contrario, ya había encontrado que la trayectoria de un proyectil era una parábola. También hay que aclarar que los descubrimientos de Harriot fueron realizaciones aisladas, a diferencia de la obra galileana, que fue uno de los cimientos donde descansan la nueva física y la nueva cosmología que estaba construyéndose.

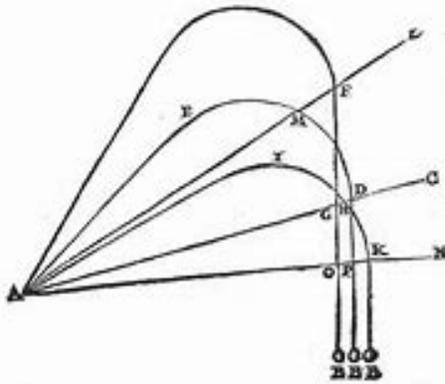


Figura 4. Trayectorias de una bala de cañón según Harriot

## Simon Stevin

Matemático, físico e ingeniero militar holandés (Fig. 5). No se conocen con exactitud los años y lugares de nacimiento y muerte. Las fechas más aceptadas son 1548, en Brujas (actualmente Bélgica), y 1620, en La Haya o Leiden. Su padre, Antheunis Stevin, y su madre, Catelyne Van der Pont, no estaban casados. Posteriormente, su madre contrajo nupcias con un comerciante adinerado de la seda y alfombras, lo cual permitió que el joven Stevin tuviera una educación universitaria. Estudió en la Universidad de Leiden y ahí conoció a Mauricio de Nassau, hijo de Guillermo de Orange, estatúder de Holanda. Al ser asesinado este último, Mauricio sucedió a su padre. Stevin entró a trabajar a su servicio como consejero y tutor. Fue nombrado superintendente de obras públicas, sobre todo estaba encargado de supervisar la construcción y el mantenimiento de los diques marítimos (Fig. 6). Su nombre aparece en muchos trabajos de la época sobre ingeniería militar e hidráulica.



Figura 5. Simon Stevin



Figura 6. Supervisión de la construcción y mantenimiento de los diques en Holanda

Es importante su trabajo en álgebra. Fue uno de los primeros en introducir números negativos en las ecuaciones algebraicas e introdujo una notación decimal poco práctica que no tuvo aceptación (Fig.7). También incursionó en la semiología o filosofía del lenguaje y estaba convencido de que el holandés imperaría como lenguaje universal, ya que en este idioma los conceptos que se pueden expresar con monosílabos son muchos más que en cualquier otra lengua. Esto lo llevó a despreciar el latín como lengua científica y a escribir sus trabajos en holandés. Lo anterior limitó la difusión de su obra fuera de Holanda.

$$8 \textcircled{0} 9 \textcircled{1} 3 \textcircled{2} 7 \textcircled{3} [= 8,937]$$

$$\begin{matrix} \textcircled{0} & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} \\ 5 & 7 & 8 & 9 \end{matrix} [= 5,789]$$

$$732 \textcircled{2} [= 7,32]$$

$$5 \textcircled{2} 4 \textcircled{5} [= 0,05004]$$

**Figura 7.** Notación decimal de Stevin que no tuvo mucha aceptación

En teoría musical y acústica fue el primero en dar una definición y medida del temperamento justo en las notas musicales, además de definir la frecuencia de vibración que corresponde a cada nota musical. Sus estudios musicales parecen estar inspirados en la obra de Vincenzo Galilei, padre del científico italiano y severo crítico de las teorías musicales que prevalecían en la época.

Como parte de sus obligaciones como funcionario del gobierno de Mauricio de Nassau, llevaba la administración y fue pionero en la *contabilidad de partida doble*, en la cual se manejaban *el deber y el haber*. Dicha técnica la conoció a través de los estudios de Girolamo Cardano en el tema, y esto lo condujo a la introducción de los números negativos dentro de las ecuaciones algebraicas.

En lo que respecta al terreno de la física es importante su obra en los campos de la hidrostática y la hidráulica. En el terreno de la mecánica, en la época estaban presentes los estudios sobre la caída de los cuerpos y el lanzamiento de proyectiles con teorías que intentaban explicar adecuadamente estos

fenómenos y que la física aristotélica no lograba realizar. En particular, Simón Stevin es uno de los primeros científicos que plantearon la realización de experimentos consistentes en arrojar objetos desde una torre para contradecir la opinión aristotélica de que los cuerpos más pesados llegaban al suelo antes que los livianos. Este tipo de experimentos ya era bastante común en su época y lo realizaban distintos pensadores que querían refutar la opinión aristotélica.

En su época, Stevin fue muy conocido por construir un vehículo terrestre movido por velas que podía transportar a más de una veintena de personas a una velocidad de 80 km/h. Dio una demostración al príncipe de Nassau, Mauricio de Orange, quien lo vio más que nada como un entretenimiento y prohibió su uso de manera práctica, pues llevaría a la ruina a los arrieros y transportistas que utilizaban carruajes movidos por caballos (Fig. 8).

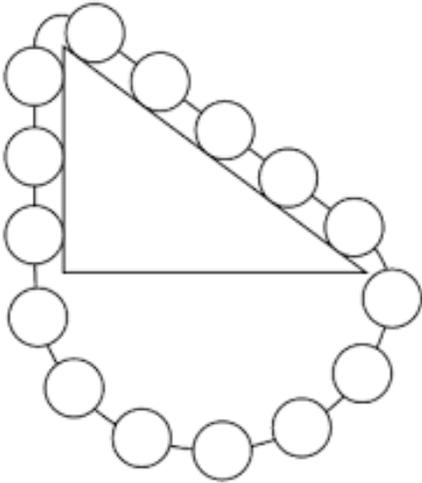


**Figura 8.** Carro impulsado por el viento. Alcanzaba cerca de 80 km/h y transportaba más de 25 personas

Son muy importantes sus trabajos sobre estática y cuerpos en equilibrio. Introdujo la regla del paralelogramo de fuerzas. Su primer trabajo sobre estática fue publicado en flamenco, en la ciudad de Leyden, en 1586. Una versión más completa apareció en 1605. Finalmente, en 1608, Stevin publicó sus trabajos al respecto bajo el título de *Hypomnemata Mathematica*. Este trabajo fue traducido al francés, en 1634.

La estática de Stevin fue desarrollada geoméricamente de una manera similar a la utilizada por Arquímedes. Es famoso el problema planteado por él, conocido como “Cadena de Stevin”, el cual consiste en el equilibrio de un cuerpo pesado atado a una cadena de cuerpos iguales sobre un plano inclinado (Fig. 9). La demostración original consiste en suponer que la diferencia de los pesos en uno de los lados del plano respecto al otro provocaría que la cadena comenzaría a girar y así

permanecería indefinidamente. Como esto es imposible, la conclusión es que los cuerpos están en equilibrio. Se puede realizar una rigurosa demostración de tal afirmación utilizando la notación moderna de las matemáticas vectoriales. Sin embargo, enfatizar la forma original con que Stevin enfrentó el problema es poner de manifiesto el desarrollo de las ideas científicas de su época.



**Figura 9.** Cadena de Stevin

## Referencias

1. A. Koestler, *Los Sonámbulos*, CONACyT (1981) México (1981) p. 421.
2. S. Drake, *Discoveries and Opinions of Galileo*, Garden City, New York, Doubleday (1957) p. 59.
3. T. Harriot, *Projectile and Rectilinear Motions of Bodies* (Manuscritos añadidos, 6789, folios 30v y 78).
4. Para comprobar que el fenómeno de la caída de los cuerpos era un tema muy estudiado en la época se pueden consultar las siguientes obras: M. Mersenne, *Harmonie Universelle*, 3 vols., Paris, CNRS (1975) p.111; H. Fabri, *Tractatus Physicus De Motu Locali*, Lyon. (1646); G. Battista Riccioli, *Almagestum Novum*. I (1), libro II (1651) cap. XXI, p.392; C. Huyghens, *Oeuvres completes de Christian Huyghens*, vol, 17, La Haya, Martinus Nijhoff. Todas estas obras son citadas en J. L. Álvarez García, *Historias galileanas*, Facultad de Ciencias, UNAM y Juan Pablos Editor, México (2018).
5. S. Drake, *Galileo Studies*, Michigan, Ann Arbor, University of Michigan Press (1970).
6. S. Stevin, *Oeuvres Mathematiques*, Leyden (1634).
7. J. L. Álvarez G. y Y. Posadas V., "El movimiento de caída libre (de Galileo a Huyghens): afinando el valor de una constante", *Boletín de la Sociedad Mexicana de Física*, 17, No.2 (abril-junio, 2003) 91-96 (ISSN 0187-4713).



# Propagación de luz en estructuras helicoidales

Juan Adrián Reyes,  
Laura Olivia Palomares

Facultad de Ciencias y departamento de Física Química,  
Instituto de Física UNAM  
Av. Universidad 3000, Circuito Exterior S/N  
Apartado Postal 20-364 C.P. 01000 CDMX, México

[adrian@fisica.unam.mx](mailto:adrian@fisica.unam.mx)

## Estados de agregación de la materia

Los estados de agregación de la materia más conocidos son el sólido, el líquido, el gas y el plasma (véase Fig. 1), los cuales son asequibles en este orden incrementando la temperatura o energía térmica de un material a partir de temperaturas bajas, cuando la presión a la que se encuentra dicho material no cambia [1]. Estos estados son exhibidos por las sustancias más comunes, como el agua, y presentan ciertas propiedades de orden en las estructuras microscópicas que los caracterizan, mismas que discutiremos a continuación. Consideremos primero el estado sólido, el cual puede ser de tres tipos: amorfo, cristalino y cuasicristalino [2]. En los materiales amorfos, las moléculas que los constituyen no poseen un orden específico y se podrían considerar fluidos con escalas de tiempo de flujo muy largas. Algunos ejemplos de estos materiales son los vidrios, ciertos polímeros a temperatura ambiente y también algunas mezclas. En cambio, en el estado cristalino los átomos o moléculas se encuentran completamente ordenados formando una red tridimensional periódica muy grande (casi infinita,

considerando escalas moleculares). Esto da lugar a que el número de posibles estructuras periódicas sea finito. En total hay 14 estructuras y se conocen como redes cristalográficas de Bravais [2]. Una red de Bravais es invariante ante algunas cuantas rotaciones y reflexiones, así como translaciones por múltiplos enteros de los parámetros de red a lo largo de los vectores de red de la estructura [2]. Esto significa que el estado sólido cristalino es tan ordenado que solo admite un número limitado de transformaciones ante las cuales es invariante. Ejemplos de materiales cristalinos los conforman los compuestos químicos denominados sales, como la sal de mesa o como algunos sólidos metálicos.

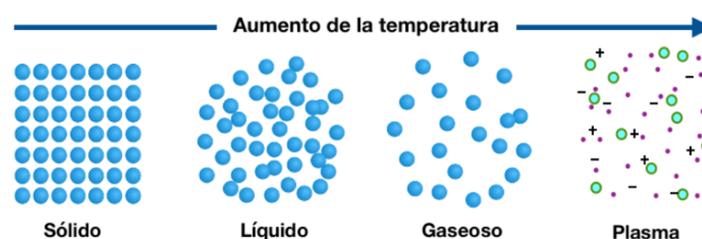


Figura 1. Estados de agregación de la materia más conocidos

Por otra parte, los líquidos ordinarios son materiales que generalmente tienen menor densidad que los sólidos —a excepción de sustancias como el agua— y en donde la posición de las moléculas que los forman está cambiando con el tiempo y no se observa ningún orden en la posición o en la dirección de sus moléculas, en contraste con lo que ocurre con los sólidos cristalinos. De esta manera, estos materiales son invariantes ante cualquier traslación arbitraria a lo largo de uno de los tres ejes coordenados y ante cualquier rotación en torno a un eje arbitrario. Es decir, al disminuir el orden microscópico del material se incrementa el número de operaciones ante las cuales el material es invariante. También, los sólidos, los líquidos y las fases intermedias (o mesofases, que se discutirán más adelante) se clasifican como materia condensada, debido a su densidad y a que hay una interacción importante entre los átomos que los conforman [1].

**En las mesofases, o cristales líquidos, existe un orden parcial que da lugar a propiedades que combinan la flexibilidad de los fluidos con el comportamiento de los sólidos cristalinos**

Finalmente, en los estados gaseoso y de plasma, la densidad (y por lo tanto, la interacción entre los componentes de la sustancia) es mucho menor que en el caso de la densidad del líquido. La movilidad de las moléculas se incrementa sustancialmente, dando lugar al mismo tipo de desorden que en un líquido ordinario y, por tanto, a la misma totalidad de invariancias traslacionales y rotacionales [1].

### Mesofases termotrópicas

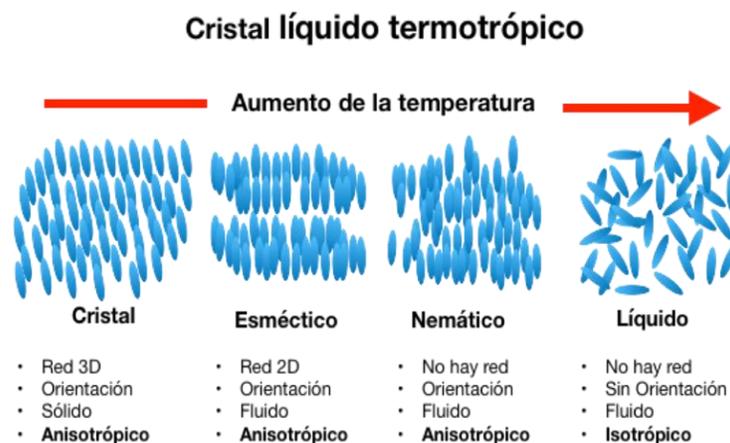
Como podemos ver, los estados sólido cristalino y líquido representan dos casos extremos, en los cuales los materiales están completamente ordenados y totalmente desordenados. En la naturaleza existen materiales, con orden intermedio entre estos dos extremos, conocidos como mesofases, cristales líquidos o fases líquido cristalinas, que es materia en la que existe un orden parcial (dando lugar a propiedades que combinan la flexibilidad de los fluidos con el comportamiento de los sólidos cristalinos) [3].

Hoy en día existen una gran cantidad de estas mesofases identificadas [4], a las cuales se siguen agregando aún más. Aquí solo discutiremos algunas de las más conocidas.

Algunos materiales con moléculas alargadas y rígidas forman mesofases conocidas como fases calamíticas [3,4]. Este tipo de moléculas pueden formarse enlazando rígidamente dos anillos de benceno y están representadas por elipsoides en la figura 2. En materiales calamíticos, si partimos de un líquido al que se le disminuye la temperatura, encontraremos la mesofase llamada nemática. Los centros de masa de las moléculas en un nemático están tan desordenados como en un líquido ordinario, pero su "orientación promedio" apunta hacia cierta dirección determinada (véase Fig. 2) [1,3,4]. Esto significa que la fase nemática exhibe un orden orientacional de sus moléculas y un desorden posicional, haciendo que este material sea un poco más ordenado que un líquido ordinario [1,4]. Este material es invariante ante cualquier traslación del tipo continuo, ante rotaciones perpendiculares y de 180 grados a la orientación promedio de las moléculas.

Otra mesofase notoria es la esméctica, la cual también está constituida por moléculas alargadas que se orientan en promedio en cierta dirección y están restringidas a moverse en planos orientados en cierto ángulo, con respecto a la dirección promedio de las moléculas. Estos materiales son periódicos pero únicamente en la dirección perpendicular a los planos confinantes, dando lugar así a un tipo de arreglo que podríamos

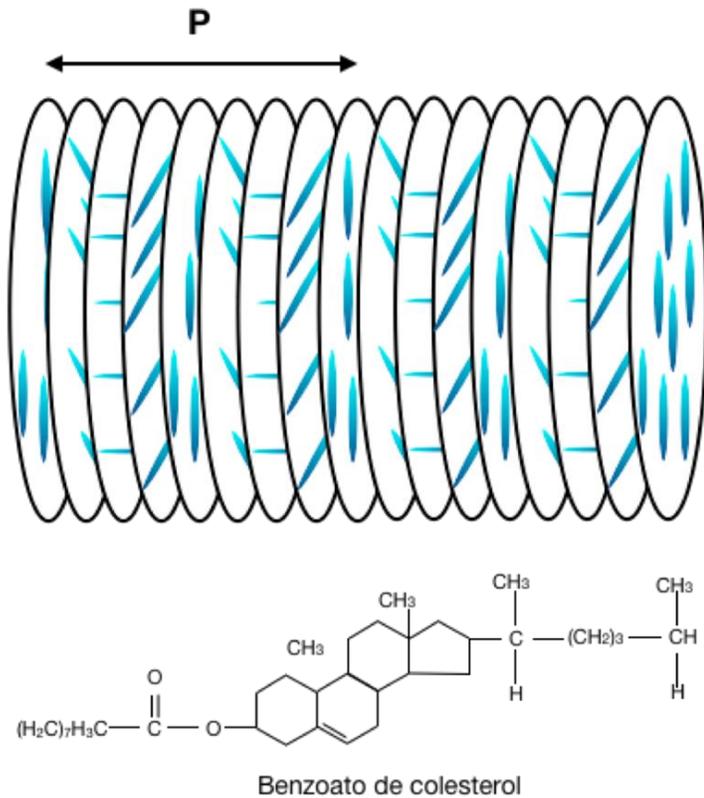
entender como un "cristal unidimensional" (Fig. 2) [1,3,4]. El ordenamiento en planos es lo que hace que estas mesofases sean más ordenadas que la fase nemática y, por tanto, pierdan invariancias como el continuo de traslaciones en la dirección perpendicular a los planos, las cuales se ven reducidas a las traslaciones discretas por múltiplos enteros de los parámetros de la red.



**Figura 2.** Mesofases calamíticas termotrópicas. Se muestra un material que cambia de cristal a líquido al incrementarse la temperatura, pasando por las mesofases esméctica y nemática.

En este artículo estamos interesados particularmente en las fases colestéricas o nemáticas quirales, en las cuales la distribución de sus moléculas forma hélices periódicas, como se muestran en la figura 3. Puede observarse que en cada plano las moléculas se alinean en cierta dirección preferencial, pero al cambiar de plano dicha dirección gira un poco, de tal manera que después de avanzar cierta distancia perpendicular a los planos (llamada período espacial) las moléculas podrán regresar a su orientación original [1,3-5]. Estas fases, al igual que los esmécticos, constituyen cristales unidimensionales. La estructura del benzoato de colesterol en la figura 3 exhibe la fase colestérica; históricamente se trata del primer cristal líquido, identificado por Reitnizer en 1888 [6].

*En la fase colestérica la distribución de las moléculas en el medio forma hélices periódicas*



**Figura 3.** Colestérico con período espacial  $p$ . El período espacial del colestérico,  $p$ , es la distancia a la cual la dirección de las moléculas rota una vuelta completa en la dirección perpendicular a las capas. Se muestra la estructura molecular del benzoato de colesterol, el cual presenta la fase colestérica [4].

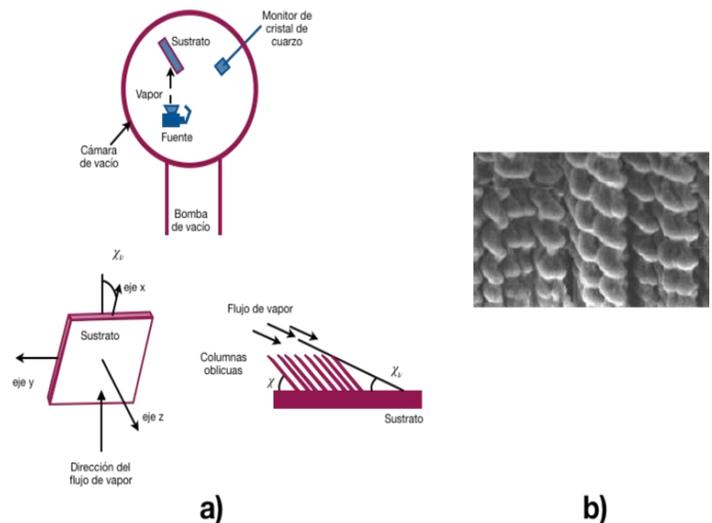
Existen sustancias en la naturaleza que presentan una o varias de las mesofases aquí discutidas, las cuales ocurren en ciertos intervalos de temperatura. Estas fases se denominan termotrópicas, por el hecho de que aparecen mediante cambios de temperatura [3,4].

### Fase colestérica y sus propiedades ópticas

Existen varias sustancias, naturaleza y sintéticas, que presentan fase colestérica. Esta fase también se puede inducir a partir de sustancias que exhiben la fase nemática, agregando pequeñas cantidades de sustancias cuyas moléculas sean quirales (que son aquellas que no se pueden superponer con su imagen especular) [1, 3, 4]. Cabe mencionar que la fase colestérica también es quiral.

También es posible construir capas artificiales (llamadas películas delgadas esculpidas) a partir de sólidos cristalinos anisotrópicos por el método de deposición física de vapor (DFV) [7]. En la figura 4a se muestra un esquema de la técnica DFV para generar estructuras helicoidales que despliegan las mismas propiedades ópticas que los colestéricos, discutidos en esta sección: dentro de una cámara de vacío, el flujo de un sólido anisotrópico evaporado se deposita de manera oblicua sobre un sustrato que gira de manera uniforme en torno a cierto eje para dar lugar a una estructura helicoidal que se asemeja a un colestérico [7].

*En la naturaleza también existen sustancias que presentan una o varias mesofases, que pueden ocurrir a ciertos intervalos de temperatura. Estas fases se denominan termotrópicas, puesto que aparecen con cambios en dicha propiedad*



**Figura 4a.** Deposición física de vapor. En una cámara de vacío se deposita un material anisotrópico en forma de vapor sobre un sustrato que se encuentra inclinado con respecto a la dirección del flujo de vapor y rota uniformemente con respecto a cierto eje (en este caso el eje  $z$ ), para obtener la película delgada deseada, en donde las columnas obtenidas usualmente tienen un ángulo de inclinación con respecto al sustrato.  
**4b.** Estructura de una película delgada esculpida quiral [7].

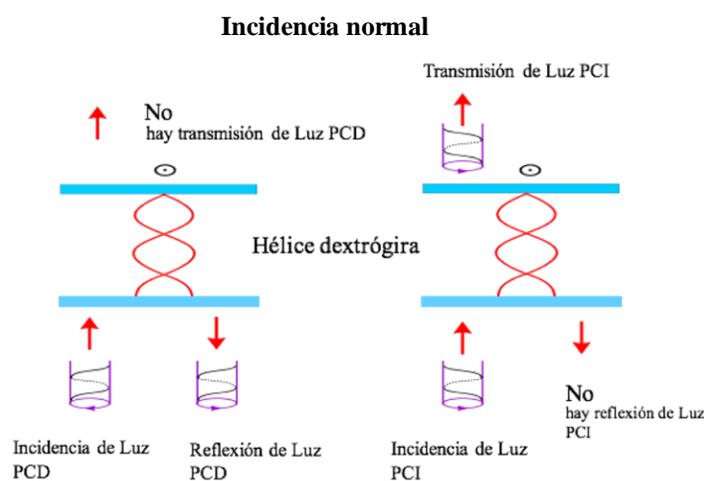
Para comenzar a describir y estudiar las propiedades ópticas de los medios quirales que hemos descrito anteriormente, es interesante señalar que un cristal líquido colestérico exhibe actividad óptica, o poder rotatorio, cuando la longitud de onda de la onda electromagnética incidente es mayor que el período espacial de la estructura helicoidal [3-5]. La actividad óptica la exhiben también algunas otras sustancias comunes, como una solución de azúcar diluida en agua, y consiste en que el plano de polarización de un haz incidente (polarizado linealmente) rota por una cierta cantidad de grados, después de atravesar una muestra de material que tiene algunos centímetros de espesor [8]. Es importante mencionar que para el caso de un material colestérico, el valor de esta actividad óptica es gigantesco, ya que la polarización de la luz incidente gira algunos grados (pero al atravesar una muestra de tan solo unas pocas decenas de micras de grosor) [3,4].

Por otro lado, la propiedad óptica icónica de un medio quiral es su habilidad para discriminar la lateralidad de un haz de luz polarizado circularmente. Esto es, si consideramos una muestra de colestérico dextrógira (de hélice derecha, o que gira en el sentido de las manecillas del reloj) cuyo eje es perpendicular a las fronteras de la misma, entonces al hacer incidir con dirección normal un haz de luz de polarización circular dextrógira (polarizado circularmente a la derecha, PCD), este será reflejado por la capa completamente. De forma distinta, si el haz de polarización circular fuera levógira (polarizado circularmente a la izquierda, PCI), este atravesaría la muestra colestérica sin ningún problema, para cierto rango de frecuencias que es determinado por los índices de refracción del colestérico y por su período espacial (véase la figura 5). A esta característica se le conoce como fenómeno circular de Bragg [3,7]. La muestra colestérica así dispuesta juega entonces el papel de un polarizador o filtro óptico de polarización circular y de frecuencia [3,7].

Cabe mencionar que el valor del período espacial del colestérico puede ser modificado por parámetros externos, como la temperatura, sustancias contaminantes, campos eléctricos o magnéticos aplicados, así como por condiciones de frontera [3,5].

**La propiedad óptica icónica de un medio quiral es su habilidad para discriminar la lateralidad de un haz de luz polarizado circularmente**

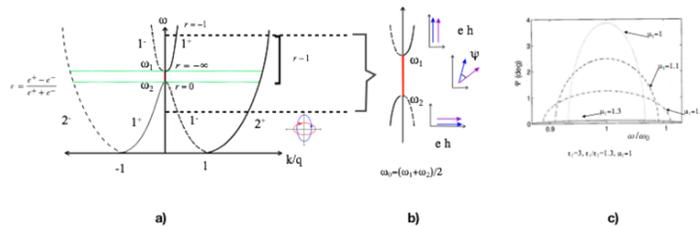
**En un colestérico dextrógira, luz polarizada circularmente derecha se refleja sin transmitirse, mientras que luz polarizada circularmente izquierda se transmite sin reflejarse (en cierto intervalo de frecuencias). A esta característica se le conoce como fenómeno circular de Bragg**



**Figura 5.** Reflexión selectiva en colestéricos. En un colestérico dextrógira, la luz polarizada circularmente derecha (PCD) se refleja sin transmitirse, mientras que la luz polarizada circularmente izquierda (PCI) se transmite sin reflejarse [3, 5].

Para describir la propagación de la luz en un medio usualmente se usa la relación de dispersión, que relaciona el número de onda con la frecuencia de la luz. La relación de dispersión tiene valores reales para los modos propagantes de la luz y valores imaginarios para los modos evanescentes [3]. En la figura 6a se muestra la estructura de bandas ópticas para incidencia axial de un colestérico, en donde se presentan las curvas correspondientes a los cuatro modos propagantes. Los modos representados por los números 1 y 2 se refieren a modos elípticamente polarizados dextrógiros y levógiros, respectivamente. Similarmente, los superíndices + y - denotan modos desplazándose hacia adelante y hacia atrás [3]. Las líneas verdes encierran la banda de reflexión parcial para los modos

dextrógiros (que se discutió anteriormente) en donde el nemático quiral o colestérico se comporta como un filtro óptico de polarización circular [3]. En la figura 6b se muestra un acercamiento de esta banda de reflexión, así como dibujos esquemáticos de los campos eléctrico y magnético en los bordes de la banda y en su interior. Aquí,  $\psi$  denota el ángulo entre dichos campos, que normalmente es muy pequeño y se muestra a  $\psi$  como función de la frecuencia adimensional en la figura 6c, parametrizado por los valores de la permeabilidad magnética del material para los modos evanescentes



**Fig. 6. a)** Se muestra la relación de dispersión, la frecuencia  $\omega$  vs. el número de onda adimensional  $k/q$ , en donde  $k$  es el número de onda de la luz y  $q$  es el número de onda del colestérico,  $q=2\pi/p$ ,  $p$  es el período espacial. Los modos propagantes de la luz están denotados por los números 1 y 2, que corresponden a **modos elípticamente polarizados dextrógiros y levógiros, respectivamente**; los signos + y – se refieren a modos propagándose hacia delante y hacia atrás, respectivamente. Las líneas verdes delimitan la banda de reflexión parcial, en donde no hay propagación de luz. **b)** Se muestra el detalle de una porción de la relación de dispersión. Las frecuencias de los modos evanescentes, correspondientes a la banda de reflexión se encuentran en la región en rojo, en las otras regiones los modos son propagantes.  $\psi$  es el ángulo entre el campo eléctrico y magnético [3]. **c)** Se muestra el ángulo  $\psi$  como función de la frecuencia adimensional de la luz y parametrizado con respecto a la permeabilidad magnética del medio.

### Estructuras helicoidales naturales con período espacial variable

Las mesofases (también llamadas cristales líquidos) juegan un papel primordial en la Biología, pues la combinación de orden y movilidad es un requisito básico para la autoorganización y la formación de estructuras en los sistemas vivos. Las mesofases se encuentran omnipresentes en la materia viva, tanto en sistemas *in vivo* como *in vitro*, y se puede decir que son parte de los ladrillos fundamentales de la vida. En los reinos animal y vegetal, la estructura helicoidal es una forma recurrente, lo que sugiere una evolución que culmina en una hélice levógiro

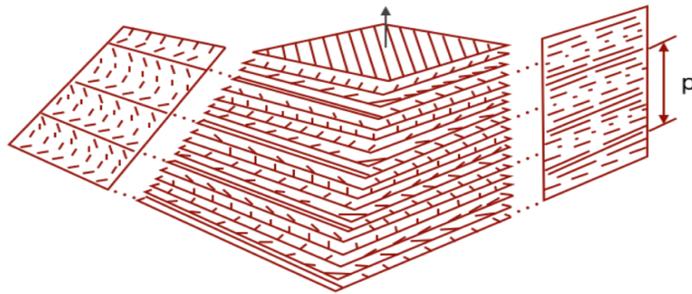
optimizada. Las estructuras colestéricas se pueden encontrar en bacteriófagos, arqueas, eucariotas, nucleoides bacterianos, cromosomas de algas unicelulares, núcleos espermáticos de muchos vertebrados, cutículas de crustáceos e insectos, huesos, tendones, córneas, escamas de pescado (y escudos), sepias, calamares, paredes de células vegetales, suspensiones de virus, telarañas, sedas de gusanos y lesiones en paredes arteriales [9].

Es importante enfatizar que en las estructuras helicoidales, el período espacial es la distancia en la que el campo de direcciones de las moléculas del medio, o campo director, da una vuelta. En una gran variedad de cristales líquidos colestéricos el período es constante. Sin embargo, las estructuras helicoidales, o quirales, de período espacial variable están omnipresentes en la materia viva, siendo las sustancias más abundantes: la quitina, los huesos y la celulosa, de las cuales comentaremos y daremos ejemplos a continuación [9].

Un ejemplo de quitina es el exoesqueleto de la langosta americana, que es un biomaterial típico cuyas propiedades mecánicas cambian con la profundidad y son inducidas por su estructura colestérica (consecuencia del apilamiento helicoidal de una sucesión de capas fibrosas de quitina-proteína) [9-13]. Las imágenes de microscopía electrónica de estos materiales muestran una notable variación en la estructura helicoidal en la frontera exocutícula-endocutícula. Cuando la exocutícula tiene una estructura mucho más fina que la de la endocutícula, aparece una discontinuidad mecánica repentina en la misma capa en donde la densidad de apilamiento de las capas helicoidales sufre cambios repentinos [14]. En resumen, los materiales a base de quitina en crustáceos y moluscos son anisótropos en su estructura, y las propiedades mecánicas surgen en función de la organización espacial de la superestructura colestérica (que por lo general exhibe un gradiente en su período espacial).

Los arreglos colestéricos con período espacial variable también están presentes en las cutículas de varios insectos (propiedad que hace a algunos de ellos iridiscentes). Sin embargo, algunos coleópteros no exhiben esta característica, como en el caso de los escarabajos de color plata cuya estructura colestérica refleja un espectro más amplio que el espectro visible, haciendo que el ojo humano sea incapaz de percibir dicha iridiscencia [15-18]. En reflectores de ancho de banda estrecho, una diferencia en el reflejo de la superficie puede surgir de las imperfecciones en la cutícula (protuberancias, hoyos y muescas) que dan como resultado un acabado mate o apariencia “sin brillo” de la cutícula [15-19].

**Diversas estructuras helicoidales de período variable se encuentran presentes en la materia viva, siendo algunas de las más abundantes la quitina, los huesos y la celulosa**

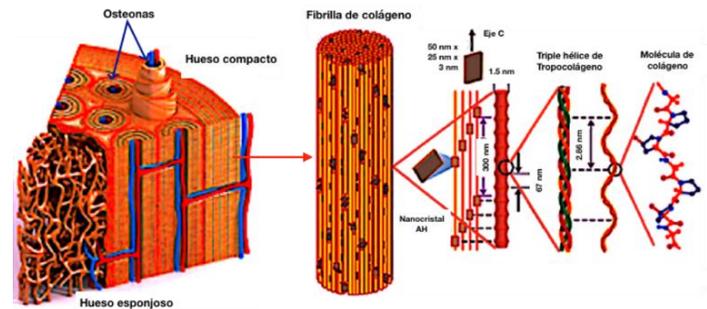


**Figura 7.** Modelo de madera contrachapada torcida. Las capas de la madera tienen una dirección de alineación de sus moléculas. El período espacial (p) es la distancia perpendicular a las capas en la que la dirección de las moléculas da una vuelta [9].

El modelo de madera contrachapada es una herramienta útil para determinar y caracterizar las estructuras helicoidales con los espectros ópticos y electrónicos de los materiales discutidos arriba. En la figura 7, las capas apiladas representan planos equidistantes y paralelos que forman una estructura piramidal. En cada capa, las orientaciones de las moléculas se representan por las líneas paralelas; su dirección gira en un ángulo pequeño y constante de un plano al otro. Una rotación de 360 grados de la dirección de la línea define el período espacial helicoidal. Cuando se observa una sección transversal, la dirección de las moléculas aparecen como una serie de arcos anidados [9, 10, 20-23]. Por su parte, el hueso contiene compuestos orgánicos e inorgánicos arreglados de una forma sofisticada, lo que le confiere una notable capacidad para soportar cargas pesadas. Su composición comprende aproximadamente un 30 % de materiales orgánicos y un 70 % de minerales, en peso en seco [24]. La dureza y la rigidez son otorgadas por las fases orgánica y mineral, respectivamente. La primera es una matriz de proteínas, principalmente colágeno y otras macromoléculas presentes (en donde los polisacáridos dominan las interfaces orgánico-mineral) [25]. La estructura de un hueso compacto consta de unidades cilíndricas adyacentes de unos 0,2 mm de diámetro, denominadas osteonas (Fig. 8).

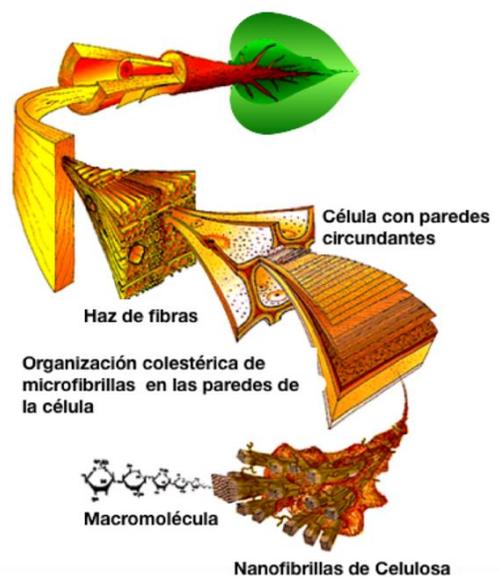
Las osteonas están formadas por laminillas concéntricas dispuestas alrededor de un canal distribuidor que contiene vasos sanguíneos. Las láminas están formadas por fibrillas de

colágeno que se acomodan helicoidalmente alrededor del canal central con cambios regulares en la orientación de las fibrillas proteoglicanas, que son ricas en ácidos glicosaminoglicanos [9].



**Figura 8.** Organización jerárquica del hueso [9]

El hueso es, por lo tanto, un compuesto de colágeno y minerales. Su fuerza proviene principalmente de su capacidad para absorber energía en pequeñas escalas de longitud a través de las fases minerales y proteicas. Su organización anisotrópica en los niveles estructurales más elevados permite el desarrollo de propiedades mecánicas para realizar sus funciones particulares. Las organizaciones de osteonas se pueden encontrar en un hueso compacto. La primera organización se ajusta a la descripción clásica de osteonas siguiendo un modelo ortogonal de madera contrachapada, es decir, con dos orientaciones principales de fibrillas. La segunda organización se ajusta al modelo de madera contrachapada torcida, donde las fibrillas siguen cambios pequeños y regulares en su orientación; en este caso, la estructura es continua.



**Figura 9.** Organización jerárquica de la madera [9]

En la transición entre estas organizaciones se pueden observar laminillas ortogonales y torcidas dentro de misma osteona, con los patrones arqueados correspondientes a los niveles más recientemente secretados [26]. Se sugiere que la estructura de contrachapado torcido aparece cuando la red de colágeno es producida por primera vez por las células, ya que siempre está presente en las capas recién creadas. Las restricciones mecánicas modulan aún más la disposición fibrilar antes de la estabilización de la red de colágeno.

La celulosa, en cambio, es producida por las plantas a través de la condensación y polimerización de la glucosa, que es un producto de la fotosíntesis. La madera contiene cantidades considerables de celulosa (Fig. 9), por lo que este polisacárido es el biopolímero más abundante. Las bacterias, los mohos mucilaginosos y algunos animales marinos también tienen la capacidad de sintetizar celulosa [27].

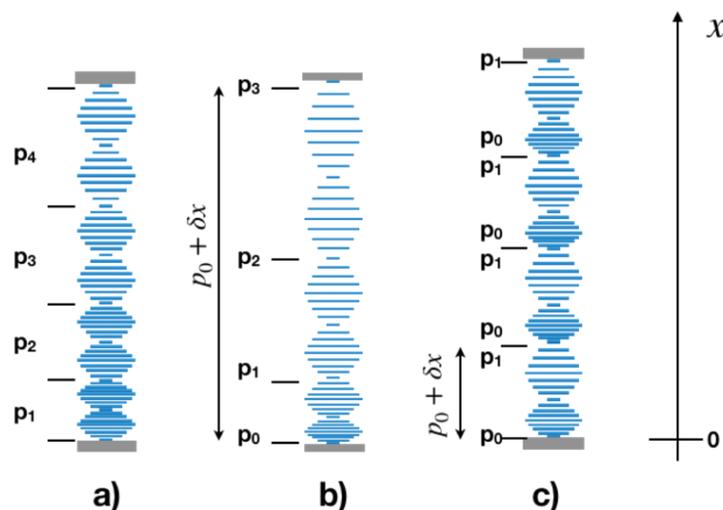
Hemos descrito algunas estructuras helicoidales presentes en la naturaleza, las cuales son la culminación de procesos evolutivos. Estas estructuras han sido el objeto de numerosos estudios para dilucidar sus propiedades físicas. Debido al interés que han generado tales propiedades y sus potenciales aplicaciones tecnológicas, en la actualidad se han investigado diversos métodos para fabricar diferentes estructuras helicoidales, incluyendo aquellas con variación gradual en el período espacial. Por ejemplo, se han obtenido cristales líquidos colestéricos con período variable estabilizados con polímeros con anisotropía dieléctrica negativa contaminados con colorantes, los cuales pueden funcionar como láseres sintonizables mediante el control del ancho de banda de reflexión (que se basa en la distribución del gradiente de período) [28]. Además, se han construido capas de cristal líquido nemático quiral con orden helicoidal que varía en tres dimensiones, es decir, colestéricos con gradiente en el período espacial que cuentan con posicionamiento angular variable en el espacio en el plano de la hélice supramolecular [29].

También se ha conseguido un método para fabricar estructuras helicoidales con diferentes períodos espaciales, para ampliar la banda de reflexión, controlando la polimerización inducida por radiación ultravioleta variando la distancia entre la lámpara ultravioleta y la celda de muestra, lo cual modifica la tasa de polimerización y conduce a la formación de estructuras quirales impresas [30].

## Modelos para estructuras helicoidales con variación gradual del período espacial

Como hemos visto, la presencia de estructuras helicoidales con gradientes de período espacial en la naturaleza es muy amplia y diversa. Con el objeto de estudiar el comportamiento óptico de estas estructuras hemos propuesto tres modelos de estructuras con gradiente de período lineal, que se muestran en la figura 10. En el primer modelo (Fig. 10a) el período espacial se toma constante hasta que la dirección de las moléculas en la dirección perpendicular a su plano completa una vuelta (360 grados) y, entonces, el período crece (o decrece) cierta cantidad dada dentro de la estructura helicoidal.

Para el segundo modelo (Fig. 10b), el período se incrementa (o decrece) permanentemente en cada punto de la muestra a una razón o tasa constante. En el tercer modelo (Fig. 10c), el período se incrementa (o decrece) linealmente desde un valor inicial a un valor final hasta completar una vuelta, para posteriormente retomar su valor inicial (al volver a su orientación inicial) [31].



**Figura 10.** Perfil del campo director en modelos de medios helicoidales con gradiente de *período espacial local* (en donde el director da una vuelta). **Fig. 10a.** El período espacial es constante, en cada capa en donde el director da una vuelta y aumenta con razón de cambio constante en vueltas subsiguientes. Se muestra un medio con períodos  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  y  $p_4$ . **Fig. 10b.** El período espacial varía linealmente a lo largo del medio. **Fig. 10c.** El período espacial varía linealmente desde el inicio del medio (y hasta que el director da una vuelta) y entonces ese perfil del director del primer bloque se repite a lo largo del medio.

**Consideremos una capa de material quiral de período variable con su eje helicoidal perpendicular a sus fronteras. Si sobre ésta se hace incidir con dirección normal un haz electromagnético, este se transmitirá y reflejara con amplitudes específicas que dependerán de las propiedades del haz y del material**

### Descripción matemática y métodos de solución

Para estudiar las propiedades ópticas de las estructuras anteriormente mencionadas consideramos una capa de material quiral de período variable, con eje helicoidal perpendicular a sus fronteras. Si sobre esta se hace incidir, con dirección normal, un haz electromagnético, este se transmitirá y reflejara con amplitudes específicas que dependerán de las propiedades del haz y del material.

Consideramos que el material se encuentra entre las fronteras demarcadas por los planos  $x = 0$  y  $x = L$ , en donde  $X$  es el eje de inhomogeneidad del medio, es decir, que el eje de la hélice del material helicoidal se encuentra a lo largo del eje  $X$ . La propagación de ondas ópticas se rige por las ecuaciones macroscópicas de Maxwell y las ecuaciones constitutivas del material quiral [32]. Al establecer las ecuaciones de Maxwell en unidades gaussianas, para un bloque de un medio no magnético quiral, se llega a la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \Psi(x)}{\partial x} = i\kappa_0 A(x)\Psi(x) \dots (1),$$

en donde  $\Psi(x) = (e_y, e_z, h_y, h_z)e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)}$  es un vector constituido por las componentes transversales de los campos eléctricos y magnéticos;  $\kappa_0 = \frac{\omega}{c}$  es el número de onda,  $\omega$  la frecuencia de la luz y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío;  $\kappa_0 = (\kappa_{0x}, \kappa_{0y}, \kappa_{0z}) = \kappa_0(\cos(\theta), \sin(\theta), 0)$  es el vector de onda,  $\theta$  es el ángulo de incidencia de la luz y  $A$  es una matriz que depende de las constantes dieléctricas del tensor dieléctrico y de las componentes del vector de onda, que a su vez dependen de la coordenada  $X$  [31].

La Ec. (1) tiene soluciones de la forma:

$$\Psi(L) = M \Psi(0),$$

en donde  $M = e^{i\kappa_0 \int_0^L A(x') dx'}$  es la matriz de transferencia y se puede resolver numéricamente [7,31].

**Con la matriz de transferencia se obtienen las amplitudes de las ondas electromagnéticas que están a la derecha de la muestra, a partir de las amplitudes de las ondas a la izquierda**

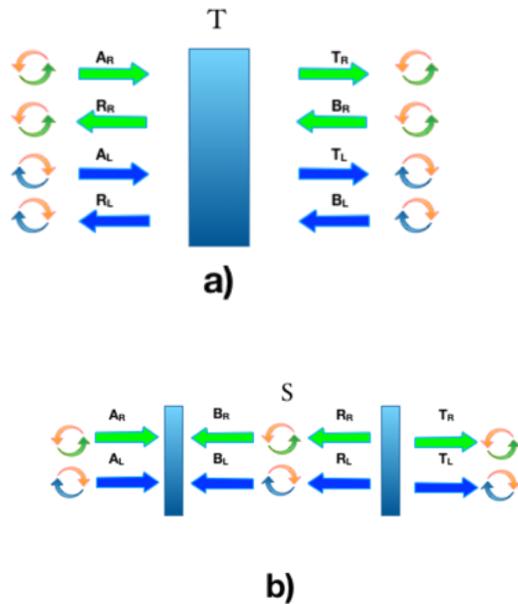
### Matrices de transferencia y dispersión para el estudio de las propiedades ópticas

El haz electromagnético incidente sobre el medio quiral que consideramos está constituido por ondas planas que se pueden expresar como la combinación lineal de dos haces de polarización circular de lateralidades opuestas (polarización circular derecha, PCD, e izquierda, PCI). En la figura 1 la, las flechas verde y azul que apuntan hacia la muestra (rectángulo azul) por la izquierda—de amplitudes  $A_R$  y  $A_L$ —o por la derecha—de amplitudes  $B_R$  y  $B_L$ —representan los haces incidentes en el medio, con polarizaciones circulares dextrógiras (PCD) y levógiras (PCI), respectivamente. Complementariamente, también se observan flechas a la izquierda de la muestra que representan ondas reflejadas—de amplitudes  $R_R$  y  $R_L$ —y flechas a la derecha de la muestra que representan ondas transmitidas—de amplitudes  $T_R$  y  $T_L$ — cada onda con polarización circular, de cada una de las lateralidades mencionadas.

Como se indica en la figura 1 la, la relación entre las amplitudes de las ondas electromagnéticas que están a la izquierda de la muestra se relaciona con aquellas que están a la derecha por medio de la matriz  $T$  de transferencia [7,8]. Si, por otro lado, estas amplitudes se reacomodan de tal forma en que las amplitudes de las ondas electromagnéticas que emergen de la muestra se obtengan a partir de las ondas incidentes, entonces a la matriz que las relaciona se le conocerá como matriz de dispersión (véase la figura 1 b).

El valor absoluto del cuadrado de la magnitud de los elementos de las matrices de transferencia y dispersión nos proporciona las transmitancias y reflectancias copolarizadas (en las que los haces incidente y emergente tienen la misma lateralidad) y depolarizadas (en las que los haces incidente y emergente tienen distinta lateralidad) para ambas lateralidades [7]. Esta información nos permite describir el comportamiento exhaustivo óptico de la capa quiral con gradiente de período.

**Con la matriz de dispersión se obtienen las amplitudes de las ondas electromagnéticas que emergen de la muestra a partir de las amplitudes de las ondas incidentes**



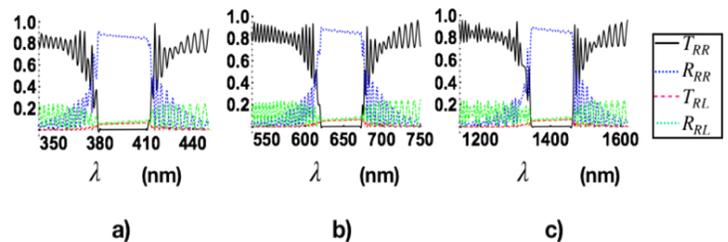
**Figura 11a.** Matriz de transferencia T. La aplicación de la matriz T a las ondas electromagnéticas en un lado del medio da como resultado las ondas al otro lado del medio. Las ondas a la izquierda del medio son las ondas incidentes y reflejadas, en donde las ondas incidentes tienen amplitudes  $A_R$  (onda circularmente polarizada derecha, PCD) y  $A_L$  (onda circularmente polarizada izquierda, PCI) y las ondas reflejadas tienen amplitudes  $R_R$  (PCD) y  $R_L$  (PCI). Las ondas a la derecha del medio son las ondas incidentes y transmitidas; con amplitudes  $B_R$  (PCD) y  $B_L$  (PCI), para las ondas incidentes y  $T_R$  (PCD) y  $T_L$  (PCI), para las ondas reflejadas. **Fig. 11ab.** Matriz de dispersión S (scattering). La aplicación de la matriz S a las ondas que inciden en el medio (PCD y PCI), da como resultado las ondas que salen, y que son las ondas reflejadas y transmitidas.

## Aspectos ópticos de medios helicoidales con gradiente de período espacial

En esta sección presentamos algunos resultados obtenidos al analizar los espectros ópticos para materiales representados por los modelos de la figura 10, los cuales se obtuvieron numéricamente por medio de la aproximación uniforme por partes de la matriz de transferencia [7].

En la figura 12 se muestran los espectros ópticos de medios estructuralmente quirales de hélice derecha y período espacial constante, cuando luz incide perpendicularmente sobre el medio. Observamos la llamada banda de Bragg, en la cual no hay transmisión en un intervalo de longitudes de onda (para luz con la misma helicidad del material) en este caso para luz circularmente polarizada derecha, mientras que luz con esta polarización se refleja. Esto es lo que conocemos como fenómeno circular de Bragg, como se ya se ha mencionado. La figura muestra tres ejemplos con diferente período espacial, observamos que la banda aparece a longitudes de onda mayores cuando el período espacial es mayor.

**El valor absoluto del cuadrado de la magnitud de los elementos de las matrices de transferencia y dispersión nos proporciona las transmitancias y reflectancias copolarizadas y depolarizadas. Esta información en conjunto nos permite describir el comportamiento óptico**



**Figura 12.** Espectros ópticos para una estructura quiral de período constante. Espectros de transmisión,  $T_{RR}$ ,  $T_{RL}$  y espectros de reflexión,  $R_{RR}$ ,  $R_{RL}$  para un medio estructuralmente quiral construido a partir de un material con simetría local de grupo puntual  $42m$ , con índices de refracción  $n_1 = 1.643$ ,  $n_3 = 1.789$ . El índice de refracción del medio circundante es  $n_0 = 1$ , la inclinación de las columnas en la estructura es  $X = 5^\circ$ , el número de períodos es  $n = 50$ . **Fig. 12a.** El período espacial es cte.,  $p_1 = 230$  nm. **Fig. 12b.**  $p_2 = 377$  nm. **Fig. 12c.**  $p_3 = 818$  nm.

En la figura 13 observamos la transmisión y reflexión para estructuras helicoidales dextrógiras con período espacial variable de acuerdo al modelo de la figura 10a, cuando luz incide en la muestra perpendicularmente. En los casos que se ilustran, el período espacial inicial de la muestra, es decir el período espacial en el borde de la capa en el que incide la luz, es el mismo que el del material con espectros ópticos como los mostrados en la Fig. 12a, el período se incrementa uniformemente cada vez que el campo director da una vuelta. Como se aprecia en las figuras 13a y 13b las bandas ópticas de Bragg aparecen ensanchadas y son más anchas entre mayor es la diferencia entre el período espacial inicial y final en la estructura, es decir, el ancho de banda se incrementa al incrementarse la tasa de crecimiento del período en la muestra.

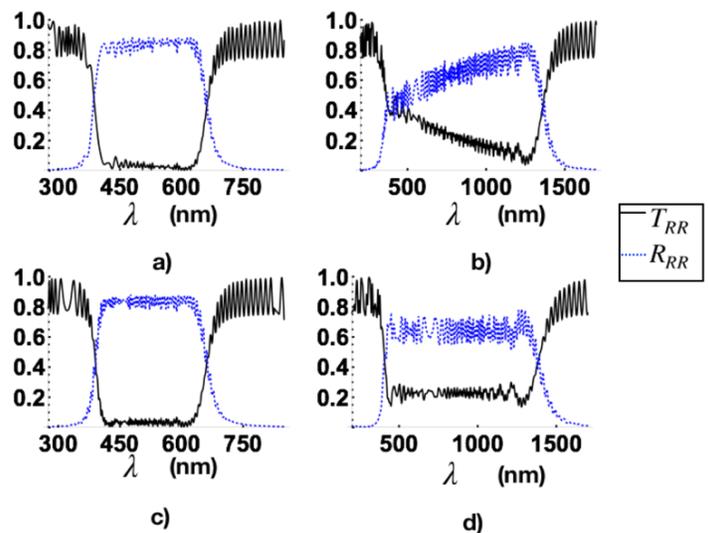
En las figuras 13c y 13d se muestra los espectros ópticos para una estructura con variación de período espacial como el descrito en la Fig. 10b, en donde hay una variación lineal del período espacial a lo largo del eje helicoidal. En estos casos los períodos espaciales iniciales y finales son iguales a los de las figuras 13a y 13b, respectivamente. Observamos bandas de Bragg en los mismos intervalos de longitudes de onda de la luz que en los incisos a) y b), solo que las bandas se observan más simétricas, respecto al centro de banda, esto debido a que en todas las regiones el período espacial está distribuido uniformemente, y no hay secciones con un determinado período que cubra una mayor parte de la estructura, a diferencia del primer caso en el que el período cambia uniformemente (Fig. 10a). En ese caso los períodos más grandes ocupan más espacio en la estructura. En consecuencia, cuando el valor del período varía linealmente en la estructura helicoidal, la transmisión de la luz se distribuye más uniformemente para longitudes de onda cortas y largas en el régimen de Bragg, disminuyendo así la asimetría en las bandas ópticas [31].

Es importante notar que la región de longitudes de onda de las bandas ópticas en las Figs. 13a y 13c abarca las longitudes de onda de la banda de la Fig. 12a y 12b y las bandas en las Figs. 13b y 13d abarca las bandas de la Figs. 12a y 12c. Esto esta relacionado con que el período espacial inicial, de los medios cuyos espectros ópticos se muestran en las Figs. 13b y 13d, coincide con el del medio que exhibe los espectros de la Fig. 12a y el período final coincide con el del medio que exhibe la banda óptica de la Fig. 12c.

**En una estructura helicoidal de período variable, que tiene incrementos constantes en períodos**

**subsecuentes, o bien un incremento lineal a lo largo de toda la estructura, las bandas ópticas se ensanchan comparadas con una estructura helicoidal de período constante**

El color de los materiales descritos es estructural, es decir, el color se debe solamente a la reflexión de diferentes longitudes de onda de la luz, producida por la estructura del medio y no a pigmentos. Aquellos en donde los espectros ópticos muestran bandas anchas (como en las Figs. 13a y 13c) se observarían iridiscentes. Cuando las bandas ópticas cubren todo el espectro visible (como en las Figs. 13b y 13d) tendrían un aspecto plateado [15-18].



**Figura 13.** Espectros ópticos para el modelo de la Fig. 10a y b. Espectros de transmisión,  $T_{RR}$  y reflexión,  $R_{RR}$  para un medio estructuralmente quiral construido a partir de un material con simetría local de grupo puntual  $42m$ , con índices de refracción  $n_1 = 1.643$ ,  $n_3 = 1.789$ ,  $n_0 = 1$  (medio circundante),  $X = 5^\circ$ , el número de períodos es  $n = 50$ .

**Figura 13a.** La estructura quiral tiene un período espacial que cambia uniformemente, de acuerdo al modelo de la Fig. 10a. Aquí, la razón de cambio del período espacial es  $\delta = 3$  nm, el período inicial es  $p_i = 230$  nm y el final es  $p_f = 377$  nm.

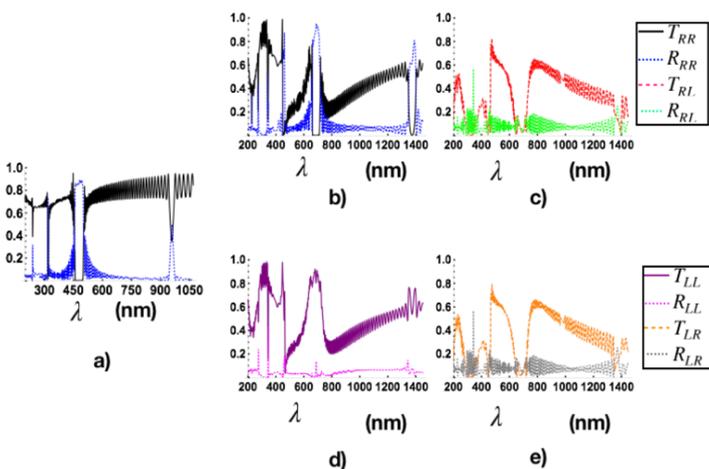
**Fig. 13b.** El período cambia uniformemente en el material, con  $\delta = 12$  nm, el período inicial es  $p_i = 230$  nm y el final  $p_f = 818$  nm.

**Fig. 13c.** Espectros ópticos para el modelo de la Fig. 10b, en donde el período espacial cambia linealmente en toda la estructura. La razón de cambio es  $\delta = 0.0098$ , el valor del período inicial,  $p_i = 230$  nm y el valor de período final es  $p_f = 377$  nm.

**Fig. 13d.** El período cambia linealmente en la estructura, la razón de cambio  $\delta = 0.025$ . El valor del período inicial es de  $p_i = 230$  nm y el valor de período final es  $p_f = 818$  nm.

En la figura 14a se presentan los espectros de transmisión  $T_{RR}$  y reflexión  $R_{RR}$ , para incidencia normal sobre un sólido quiral con los mismos parámetros que la figura 12 y 13. Para el modelo de la figura 10c, para el cual el período espacial local se incrementa linealmente en un período, este contiene  $n$  períodos idénticos. Este último hecho es la causa de que este modelo sea el único estrictamente periódico.

**En el modelo representado en la figura 10c se obtienen bandas ópticas en frecuencias centrales de banda que son armónicas. Cuando la razón de crecimiento es baja se trata de bandas de Bragg. Para las razones de crecimiento altas se obtienen bandas en donde la luz se refleja para polarización circular derecha e izquierda**



**Figura 14.** Espectros ópticos para el modelo de la Fig. 10c. Espectros de transmisión,  $T_{RR}$ ,  $T_{RL}$  y espectros de reflexión,  $R_{RR}$ ,  $R_{RL}$  para un medio estructuralmente quiral construido a partir de un material con los mismos parámetros de la figura 12 y figura 13.

**Fig. 14a.** La razón de cambio del período espacial es  $\delta = 0.1756$ , con un período inicial  $p_i = 230$  nm y final  $p_f = 279$  nm. En los siguientes paneles, la razón de cambio del período espacial es  $\delta = 0.425$ , el período inicial  $p_i = 230$  y final  $p_f = 400$  nm.

**Fig. 14b.** Se muestra la transmisión y reflexión  $T_{RR}$  y  $R_{RR}$ .

**Fig. 14c.** Transmisión y reflexión  $T_{RL}$  y  $R_{RL}$ .

**Fig. 14d.** Transmisión y reflexión  $T_{LL}$  y  $R_{LL}$ .

**Fig. 14e.** Transmisión y reflexión  $T_{LR}$  y  $R_{LR}$ .

En los paneles restantes de la figura 14 se muestran los espectros ópticos para una estructura helicoidal que corresponde, también, al modelo de la figura 10c, sin embargo, con una mayor tasa de crecimiento para el período espacial. Se observan hasta seis bandas estrechas que son filtros ópticos estrechos de polarización y longitud de onda. Las figuras 14b y 14c muestran espectros ópticos cuando una onda circular levógira incide en un material quiral diestro. En la figura 14b se observan bandas ópticas en donde no se transmite una onda circular derecha, mientras que es reflejada en un rango de longitudes de onda (estas son bandas de tipo Bragg).

En la figura 14c se observan bandas ópticas en donde luz levógira no se transmite al incidir luz dextrógira para las dos bandas a longitudes de onda largas; a longitudes cortas hay bandas en donde hay transmisión de luz dextrógira y se observa reflexión parcial. Mientras tanto, en la figura 14d, observamos bandas donde no se transmite una onda levógira, cuando una onda dextrógira incide en el material, mientras es parcialmente reflejada como una onda levógira, solo para las tres bandas que aparecen en longitudes de onda más cortas, ya que la luz se transmite y no se refleja en las dos primeras bandas a longitudes de onda más grandes.

En la figura 14e se observan bandas en donde no se transmite luz dextrógira al incidir luz levógira para longitudes de onda grandes, en cambio, para longitudes de onda cortas se observa transmisión y reflexión parcial de luz dextrógira.

Las bandas están aproximadamente en las mismas longitudes de onda centrales para las figuras 14b y 14c. Por lo tanto, a incidencia normal de una onda dextrógira, el sistema refleja tanto ondas dextrógiras como levógiras. Aunque la reflexión es baja para las ondas levógiras (menos del 20 %, en la mayor parte del espectro, y llega a ser hasta aproximadamente 60 % en una región muy angosta de longitudes de onda).

Nuestros cálculos muestran que la primera banda (a longitudes de onda más largas), se encuentra a la mitad de la frecuencia central de la banda de una estructura de período constante, que es igual al período final de la estructura helicoidal de período variable del modelo de la figura 10c. Las frecuencias centrales de las demás bandas coinciden con frecuencias que son armónicas de la primera banda, es decir, las frecuencias centrales de las bandas  $\omega_{ci} = l\omega_{cpf}/2$  ( $\omega = 2\pi c/\lambda$  y  $c$  es la velocidad de la luz), en donde  $l = 1, 2, \dots$  es el número del armónico y  $\omega_{cpf}$  es la frecuencia central de una estructura con los mismos parámetros del material y con un período espacial constante igual al período final de la estructura helicoidal con gradiente de período del modelo de la figura 10c [31].

## Aplicaciones tecnológicas

En cuanto a las estructuras artificiales, desde hace algunos años se ha hecho un esfuerzo importante para desarrollar un método eficaz para producir películas de período espacial variable en estructuras colestéricas con base en procesamientos térmicos [33].

Un procedimiento alternativo para controlar gradientes de período en estructuras colestéricas es mediante nanocompuestos, creados al difundir cristales líquidos nemáticos quirales en aerogeles de sílice (en los cuales el ancho de banda de los espectros de reflexión de las estructuras podría ampliarse) [36]. El método de control del ancho de banda mediante la inducción de una variación continua del período no uniforme tiene potenciales aplicaciones en la fabricación de dispositivos reflectores de banda ancha. Asimismo, se han diseñado filtros que son independientes de la polarización al combinar capas de mesógenos quirales levógiros con dextrógiros [37].

Muy recientemente se ha puesto un gran interés en diseñar, con base en diversos mecanismos, la difusión fotónica de brechas de banda por medio de cristales líquidos colestéricos cuyos períodos cambian gradualmente, los cuales han sido ampliamente estudiados, fabricados y aplicados con éxito en diversos contextos [38]. Aquí solo comentamos algunos ejemplos. Se reportó la fabricación de capas reflejantes en el infrarrojo, sensibles a la temperatura y controladas por la humedad y recubrimientos fotónicos reversibles de banda ancha con aplicaciones potenciales en ventanas inteligentes, diseñadas para entornos de alta humedad [39].

También, se logró con éxito (mediante el dopaje con tintas en cristales líquidos colestéricos estabilizados con polímeros con anisotropía negativa dieléctrica) un láser que permite sintonizar la longitud de onda de emisión a través del control del ancho de banda de reflexión basado en el gradiente de distribución de su período espacial [40].

***Las aplicaciones tecnológicas incluyen capas reflejantes en el infrarrojo (sensibles a la temperatura y controladas por la humedad); recubrimientos fotónicos reversibles de banda ancha con posibles aplicaciones en ventanas inteligentes, y láseres sintonizables***

## Conclusiones

Resumiendo, hemos situado el lugar que ocupan los sistemas helicoidales naturales en el contexto de la materia condensada parcialmente ordenada. Expusimos de manera especial ciertas propiedades ópticas de las mesofases coléstericas, así como la superestructura helicoidal quiral presente en algunos materiales. Posteriormente, discutimos de manera extensa cómo las estructuras helicoidales están presentes en una gran cantidad de materiales orgánicos y sus órdenes estructurales jerárquicos, además de proponer algunos modelos simples para representar esta clase de estructuras que poseen gradientes de período espacial.

Expusimos de forma breve algunos resultados obtenidos para medios estructuralmente quirales con período espacial variable que poseen localmente una simetría de grupo puntual  $42m$  y en los que incide normalmente luz polarizada circularmente. Los espectros ópticos se obtuvieron numéricamente por medio de la aproximación uniforme por parte de la matriz de transferencia. Estudiamos los espectros ópticos de tres diferentes modelos simplificados de gradientes de período espacial para representar estructuras helicoidales observadas en la naturaleza. Mostramos que, al igual que en los sistemas helicoidales naturales, la banda de reflexión para dos de los modelos considerados se ensancha al introducir gradientes de período espacial, dando lugar (en ciertos casos) al fenómeno de iridiscencia óptica. En cambio, para un gradiente lineal que se reinicia cuando el campo director da una vuelta se obtienen bandas ópticas de Bragg estrechas en frecuencias centrales que son armónicas. Para razones de cambio de gradiente pequeñas estas bandas son de Bragg, y para razones de cambio grandes se obtienen bandas reflejantes para luz polarizada circularmente derecha e izquierda.

## Referencias

- [1] P. M. Chaikin, and T. C. Lubensky, *Principles of condensed matter*, Cambridge University Press, 1<sup>a</sup>. Ed., Cambridge 1995.
- [2] C. Kittel, *Introduction to solid state physics*, John Wiley & Sons, New York, 8<sup>a</sup> Ed. 2004.
- [3] P. G. de Gennes, *The Physics of Liquid Crystals*, Clarendon Press, Oxford, 1<sup>a</sup>. Ed., 1975.
- [4] A. Jáklí, and A Saupe, *One- an two- dimensional fluids*, Taylor and Francis, 1<sup>a</sup>. Ed., 2006.
- [5] S. Pikin, and L. Blinov, *Cristales líquidos*, MIR Moscu, 1985. Sons, New Jersey, 8<sup>a</sup>. Ed., 2004. [2] S. Pikin, L. Blinov, *Cristales líquidos*, MIR Moscu, 1985.
- [6] F. Reinitzer, and *Monatsh. Chem.* 9, pp. 421, 1988. Traducción al ingles de este artículo: *Liq. Cryst.*, 5, 7, 1989.
- [7] A. Lakhtakia, and R. Messier, *Sculptured thin films*, SPIE press, Washington, 1<sup>a</sup>. Ed., 2005.
- [8] E. Hecht, *Óptica*, Pearson Addison Wesley, Madrid, 3<sup>a</sup>. Ed., 2003.
- [9] M. Mitov, *Soft Matt*, 13, 4176, 2017.
- [10] Y. Bouligand, *Tissue Cell*, 4, 189–217, 1972.
- [11] M. M. Giraud-Guille, *Tissue Cell*, 16, 75, 1984.
- [12] M. M. Giraud-Guille, *J. Struct. Biol.*, 103, 232, 1990
- [13] M. M. Giraud-Guille, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, 3, 221, 1998.
- [14] D. Raabe, C. Sachs and P. Romano, *Acta Mater.*, 53, 4281–4292, 2005.
- [15] T. Lenau, and M Barfoed, *Adv. Eng. Mat.* 10, 299, 2008
- [16] S. Berthier, *Iridescences*, Springer, New York, 2007.
- [17] A. E. Seago, P. Brady, J. P. Vigneron, and T. D. Schultz, *J. R. Soc. Interface* 6, S165, 2009
- [18] M. Srinivasarao, V. Sharma, and J. O. Park, *Yearbook of Science and Technology-McGraw-Hill*, McGraw-Hill, New York, 2011. (<https://doi.org/10.1036/1097-8542.YBI10063> ).
- [19] H. Arwin, R. Magnusson, J. Landin, and K. Jrendahl, *Phil. Mag.*, 92, 1583, 2012.
- [20] Y. Bouligand, *C. R. Acad. Sci. Hebd. Seances Acad. Sci. D*, 261, 4864–4867, 1965.
- [22] L. Besseau and M.-M. Giraud Guille, *J. Mol. Biol.*, 251, 197–202, 1995.
- [23] G. De Luca and A. D. Rey, *Eur. Phys. J. E*, 12, 291–302, 2003.
- [24] A. J. Salgado, O. P. Coutinho and R. L. Reis, *Macromol. Biosci.*, 4, 743–765, 2004.
- [25] R. Wise, S. Maltsev, M. E. Davies, M. J. Duer, C. Jaeger, N. Loveridge, R. C. Murray and D. G. Reid, *Chem. Mater.*, 19, 5055–5057, 2007.
- [26] M. M. Giraud-Guille, *Calcif. Tissue Int.*, 42, 167–180, 1988.
- [27] A. G. Matthyse, K. Deschet, M. Williams, M. Marry, A. R. White and W. C. Smith, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 101, 986–991, 2004.
- [19] H. Lu, C. Wei, Q. Zhang, M. Xu, Y. Ding, G. Zhang, J. Zhu, K. Xie, X. Zhang, Z. Hu, and L. Qiu, *Photon. Res.*, 7, 137, 2019.
- [29] M. Rafayelyan, G. Agez, and E. Brasselet, *Phys. Rev. A*, 96, 043862, 2017.
- [30] Y. S. Zhang, A. V. Emelyanenko, and J. H. J. Liu, *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, 55, 1427, 2017.
- [31] L. O. Palomares and J. A. Reyes, *J. Phys.: Condens. Matter.*, 32, 175303, 2020.
- [32] J. D. Jackson, *Classical Electromagnetics*, Wiley, New York, 1999.
- [33] M. Mitov, A. Boudet and P. Sopéna, *Eur. Phys. J. B*, 8, 327, 1999.
- [34] C. Binet, M. Mitov and A. Boudet, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 339, 111, 2000.
- [35] A. Boudet, C. Binet, M. Mitov, C. Bourgerette and E. Boucher, *Eur. Phys. J. E*, 2, 247, 2000.
- [36] A. Chen, S. Wang, H. Gao, J. Zhang, Y. Xing, A. Yang, H. Cao and A. He, *Liquid Crystals*, 46, 6, 2019.
- [37] M. Y. Jeong and K. Kwak, *IEEE Photonics J.*, 11, 4700211, 2019.
- [38] J. D. Lin, H. Y. Lin, G. J. Wei, Y. C. Chuang, L. J. Chen, T. S. Mo and C. R. Lee, *J. Mat. Chem. C*, 7, 4740, 2019.
- [39] E. P. A. Van Heeswijk, J. J. H. Kloos, N. Grossiord and A. P. H. J. Schenning, *J. Mat. Chem.* 7, 6113, 2019.
- [40] H. Lu et al *Photonics Res.*, 7, 137, 2019.



# Simulaciones por computadora en el estudio de la Materia Condensada Blanda

Ana Beatriz Salazar-Arriaga y Héctor Domínguez

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Materiales,  
Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito  
Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, CDMX, México

[betyann775@hotmail.com](mailto:betyann775@hotmail.com),  
[hectordc@unam.mx](mailto:hectordc@unam.mx)

A través de la historia hemos aprendido cómo los científicos han contribuido, en gran medida, a entender el mundo que nos rodea y comprender cómo se comporta la naturaleza. Dicho entendimiento nos puede ayudar a controlar algunas propiedades de ciertos fenómenos físicos, químicos o biológicos de interés, permitiéndonos utilizarla en beneficio del ser humano en áreas como la medicina, la ingeniería, los materiales, etc. Hasta hace algunos años, dicho entendimiento científico se hacía de dos formas tradicionales: la primera de ellas, en experimentos directos realizados en laboratorios y, la segunda, mediante cálculos teóricos. Así pues, la ciencia era solo concebida de manera teórica o experimental. El surgimiento de las computadoras nos mostró una tercera forma de hacer ciencia, las simulaciones por computadora. Y aunque esta nueva herramienta no sustituye a los experimentos convencionales ni a los cálculos teóricos, se trata de una forma alternativa de hacer ciencia; una labor complementaria que puede ayudarnos en el estudio de problemas científicos particulares.

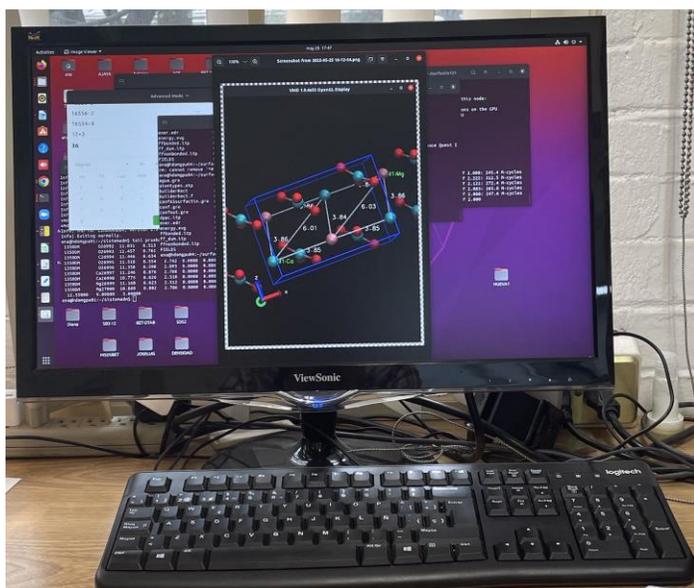
Las simulaciones por computadora pueden ayudar a los experimentos y, en particular, a investigar problemas en condiciones que son difíciles de realizar (o cuando se requiere saber más detalles microscópicos del fenómeno a estudiar). Por otro lado, también ayudan a entender modelos teóricos o a probar teorías que no tienen necesariamente una contraparte experimental o que, por su naturaleza, no se pueden realizar en un laboratorio.

Las simulaciones por computadora son de gran ayuda en diferentes áreas de la ciencia, la ingeniería y la tecnología. Dentro de la ciencia se puede mencionar simulaciones a diferentes tiempos y escalas, desde las microscópicas, mesoscópicas, macroscópicas e incluso a dimensiones astronómicas. De acuerdo con las escalas de tiempo y tamaños de los sistemas (átomos, moléculas, polímeros, macromoléculas, proteínas, por mencionar algunos) y bajo ciertas consideraciones, podemos usar diferentes aproximaciones que tienen como base tanto teorías cuánticas como clásicas.

Dentro de la ciencia de los materiales podemos encontrar simulaciones en diferentes áreas como, por ejemplo, las simulaciones en la materia condensada blanda. La Materia Condensada Blanda es una rama de la Física que estudia sistemas tales como los coloides, polímeros, tensoactivos, materiales biológicos, geles, entre otros ejemplos de materiales blandos. Es importante mencionar que el comportamiento físico de dichos materiales se produce a una escala de energía que es similar a la energía térmica a temperatura ambiente. El estudio de estos sistemas se puede llevar a cabo de manera alternativa, como se mencionó anteriormente, mediante simulaciones por computadora. De forma clásica se utilizan dos métodos en particular: dinámica molecular y Monte Carlo. El método de dinámica molecular hace uso de las ecuaciones de movimiento de Newton, es decir, se encuentran las trayectorias, velocidades y fuerzas, a diferentes tiempos, de todos los átomos involucrados en un sistema y con ellos se calculan las diferentes propiedades termodinámicas, dinámicas o estructurales [1]. Por otro lado, en el método denominado Monte Carlo, el estudio de las propiedades se realiza sobre diferentes configuraciones de equilibrio de los sistemas obtenidos por una función de distribución que está dada por las leyes de la física estadística [1].

Una de las primeras simulaciones de un líquido, usando un modelo sencillo con el método de Monte Carlo, fue realizado en el Laboratorio Nacional de los Álamos, por Metropolis [2]

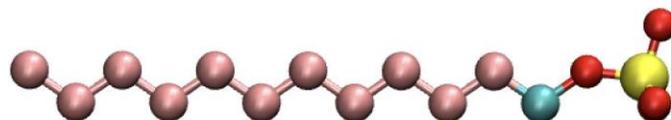
y sus colaboradores, en el año 1953, mientras que las primeras simulaciones de dinámica molecular se llevaron a cabo en 1957, por Alder y Wainwright [3]. Es interesante mencionar que las computadoras en las cuales se hicieron las primeras simulaciones eran gigantes, y que hoy en día este tipo de cálculos pueden realizarse en equipos pequeños. Las simulaciones más sencillas pueden hacerse incluso en computadoras personales y portátiles (**figura 1**). La ciencia realizada utilizando simulaciones computacionales ha evolucionado con el progreso de la tecnología, particularmente, gracias al avance mismo de las computadoras y las técnicas de computación [1,4].



**Figura 1.** Computadora donde se pueden realizar cálculos de dinámica molecular

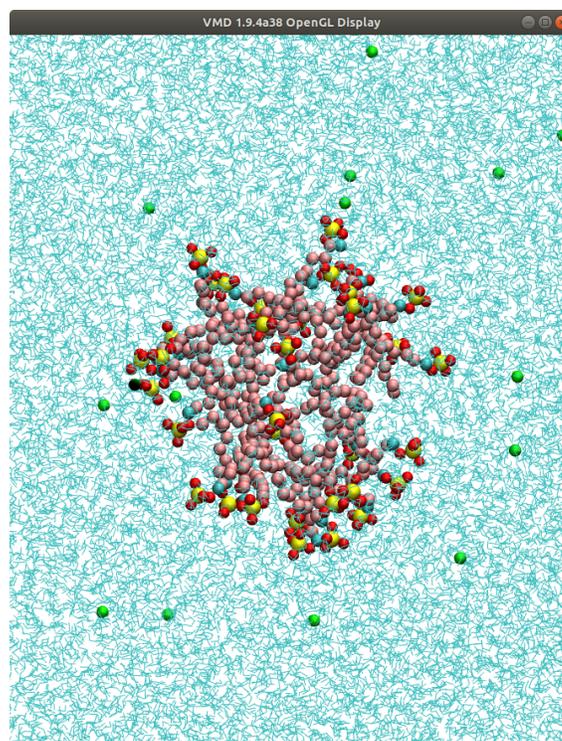
En nuestro grupo de investigación, las simulaciones por computadora son una herramienta primordial para llevar a cabo nuestras investigaciones. Se trabaja con simulaciones clásicas usando los métodos de Monte Carlo y dinámica molecular. En particular, se realizan estudios de materia condensada blanda de sistemas donde las moléculas tensoactivas juegan un papel importante [5].

Los tensoactivos, conocidos también como surfactantes, son moléculas formadas por una parte polar hidrofílica (que es afín al agua) y una parte que es hidrofóbica (repelente al agua) generalmente formadas por cadenas hidrocarbonadas (grupos metil y metileno). Son agentes que tienden a reducir la tensión superficial o interfacial en las interfaces líquido/vapor o líquido/líquido [6] (**figura 2**).



**Figura 2.** Dodecil sulfato sódico (SDS)  $C_{12}H_{25}SO_4Na$

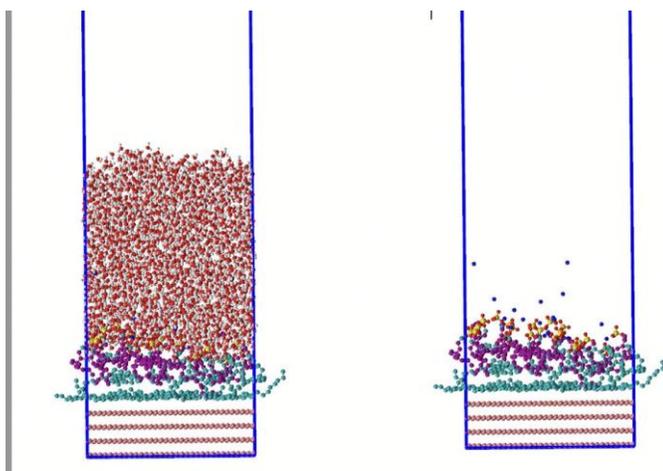
Dicha característica dual de las moléculas les confiere interesantes propiedades, tales como la formación de micelas al llegar a una concentración característica, llamada Concentración Micelar Crítica (CMC), en donde las partes polares están en contacto con la fase acuosa y las partes hidrofóbicas están agrupadas entre ellas, evitando el contacto con el agua (**figura 3**). Las micelas son agregados moleculares que se forman por el autoensamblaje de las moléculas, formando diferentes geometrías (esféricas, monocapas, bicapas o vesículas) dependiendo de las condiciones termodinámicas, tales como la concentración y la temperatura. Por sus propiedades fisicoquímicas únicas, los tensoactivos tienen una amplia aplicación en diferentes áreas de la industrial, tales como en la fabricación de jabones, detergentes, cosméticos, aditivos, lubricantes, pinturas, petroquímica, por mencionar solo algunas aplicaciones.



**Figura 3.** Micela formada por moléculas de tensoactivo en el seno del agua

## Resultados: Tensioactivos en la desorción de alcanos en superficies sólidas

El petróleo es una mezcla compleja, compuesta en su mayoría por hidrocarburos y compuestos que tienen heteroátomos como el nitrógeno, azufre y oxígeno [7]. Es por ello que realizar una simulación molecular del crudo real, usando todos los componentes, sería inviable y demasiado costosa desde el punto de vista computacional. Sin embargo, existen alternativas para entender el fenómeno de la desorción, como simular modelos simples (véase figura 4), estudiar cómo se desprenden algunos componentes del petróleo (hidrocarburos) de las superficies con ayuda de algunos surfactantes, así como estudiar las interacciones que hay entre las moléculas (**Fig. 4**).



**Figura 4.** Izquierda: Representación de una mezcla de tensioactivos (aniónico y anfotérico) (amarillo y violeta), sobre una capa de hidrocarburos (verde) depositados en grafito (rosa), todo esto cubierto de agua (rojo y blanco). Derecha: Se muestra el sistema con la ausencia de moléculas de agua para una mejor visualización

En la figura 4 se representa un sistema de moléculas de decano depositadas en una superficie sólida de grafito con moléculas tensioactivas, por ejemplo, el dodecil sulfato sódico (SDS, por sus siglas en inglés), que es una molécula aniónica, y una betaina (que es una molécula no iónica) sobre los que se realizaron simulaciones por computadora y de dinámica molecular a diferentes concentraciones para ver el efecto de los surfactantes en la desorción. Se estudia la efectividad de cada surfactante al analizar la razón de las moléculas de hidrocarburos que se desprenden de la superficie con respecto al total de ellas a una misma temperatura y a varias concentraciones para obtener gráficas de isotermas de

adsorción. El análisis de las simulaciones realizadas sobre las moléculas mencionadas anteriormente muestra que un tensioactivo aniónico fue el que logró una mejor desorción que los tensioactivos anfóteros [8].

De las simulaciones computacionales es posible obtener una mayor información microscópica como, por ejemplo, determinar que la desorción o el desprendimiento ocurre por las colas hidrocarbonadas de los tensioactivos (que son las que interactúan con los hidrocarburos), mientras que las cabezas de los surfactantes se encuentran solvatadas por las moléculas de agua. El estudio también podría realizarse usando otro tipo de surfactantes o mezclas, incluyendo un tensioactivo catiónico o usando una superficie *más real*, como la dolomita.

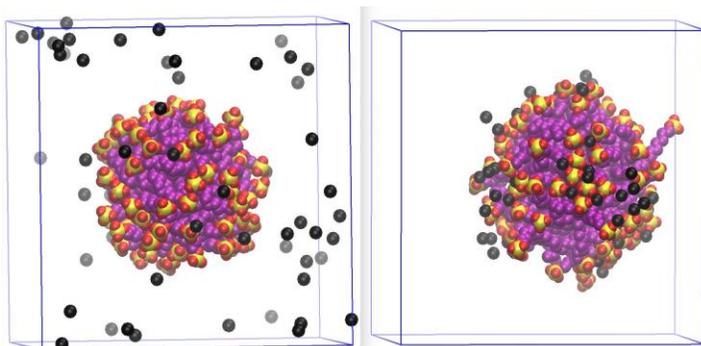
## Resultados: Tensioactivos en la retención de contaminantes

Un problema de mucha importancia, no solo ambiental sino también de salud pública, es la contaminación causada por moléculas orgánicas (como el fenol) y por metales en medios acuosos (como el plomo, aluminio o el cadmio) que pueden tener un efecto negativo en la salud del ser humano.

Es por eso que se han usado diferentes técnicas experimentales para la captura de dichos contaminantes y remediar este problema de la mejor manera posible. En este aspecto, las simulaciones por computadora también pueden ayudarnos a encontrar nuevas tecnologías o métodos de captura de contaminantes que después pueden ser una propuesta para llevar a cabo de manera experimental en un laboratorio. En particular se proponen modelos en donde los tensioactivos pueden servir como una alternativa a los métodos convencionales, aprovechando las propiedades de dichas moléculas. En la figura 5 se muestra un modelo computacional para el estudio de la retención y captura de plomo (**figura 5**).

Puede verse un modelo con una micela formada por moléculas de SDS inmersa en una disolución de agua contaminada con una sal de plomo. Dadas las condiciones termodinámicas del sistema, la micela tiene una forma esférica e inicialmente los iones de plomo están distribuidos uniformemente en toda la caja de simulación. Al realizar una dinámica molecular se observa que, al transcurrir el tiempo, los iones de plomo se acercan al tensioactivo, adhiriéndose a las cabezas polares, mostrando que la retención ocurre sobre la superficie de la micela y no por el interior de ella. Las simulaciones se llevan a cabo a diferentes tamaños de micelas y a diferentes

concentraciones de la sal de plomo para encontrar las mejores condiciones de retención. Mediante un análisis de perfiles de densidad (de las cabezas polares de los tensoactivos y de los iones de plomo) se puede determinar la cantidad de iones metálicos retenidos por la micela con respecto al total de iones de plomo en el sistema, y con ello también se puede calcular una razón de adsorción [9].



**Figura 5.** Micela de SDS con sal  $PbSO_4$ . Izquierda: Configuración inicial. Derecha: Configuración final. Los colores rojo y amarillo representan los grupos de la cabeza del SDS, el violeta representa los grupos de la cola del SDS y el negro representa los iones de plomo. Para la visualización, los grupos de agua y  $SO_4$  no se muestran

Se puede hacer una investigación para determinar si hay un tamaño o forma de micela óptimo para la captura de los contaminantes, al igual que una concentración más favorable de retención. Incluso, se han hecho estudios para otro tipo de sales de plomo y de otros iones metálicos.

## Conclusiones

Las simulaciones computacionales son una herramienta poderosa para realizar investigación en las diferentes áreas de la ciencia y pueden dar información complementaria a los experimentos convencionales de laboratorio y a las teorías. Estos experimentos computacionales se han empleado para el estudio de la materia condensada blanda y, en particular, para analizar el uso de moléculas tensoactivas en campos de la desorción y retención de contaminantes.

En el campo de la desorción se muestra la eficiencia de los tensoactivos para la remoción de alcanos en superficies sólidas y, aunque en el presente reporte se muestran las tendencias con tensoactivos aniónicos y no polares, pueden extenderse los estudios con tensoactivos catiónicos (o con sus diferentes mezclas) que permita hacer una comparación con los resultados ya obtenidos.

También se muestran resultados de cómo los tensoactivos que forman micelas pueden usarse para retener contaminantes metálicos en agua. No solo es posible estudiar retención de contaminantes en soluciones acuosas, también es posible estudiar el uso potencial de micelas de tensoactivos para la captura de alcoholes en disoluciones orgánicas (como aceites) que son de gran utilidad en varias áreas de la industria. Este estudio puede realizarse usando otro tipo de surfactantes o mezclas (incluyendo, ahora, un tensoactivo catiónico) que nos permitan estudiar diferentes tipos de problemas y así hacer un análisis con otras moléculas tensoactivas, otras sales metálicas y llegar a nuevas propuestas experimentales.

## Referencias

- [1] M. P Allen and D. J. Tildesley, "Computer Simulation of Liquids." 2<sup>nd</sup> Edition. Oxford University, 2017.
- [2] Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., and Teller, E. Equation of state calculations by fast computing machines. *J. Chem. Phys.* 1953, 21, 1087–1092.
- [3] Alder, B. J. and Wainwright, T. E. Phase transition for a hard sphere system. *J. Chem Phys.* 1957, 27, 1208–1209.
- [4] D. Frenkel and B. Smit, "Understanding Molecular Simulation", 2<sup>nd</sup> Edition. Academic Press, 2002.
- [5] D. Rapaport, "The Art of Molecular Dynamics Simulation". 2<sup>nd</sup> Edition. Cambridge University Press, 2004.
- [6] T. L. Brown, H. E. LeMay, Jr, B. E. Bursten, J. R. Burdge., *Química. La ciencia central*, 9<sup>th</sup> edición. Pearson Educación. 2004.
- [7] J. M. Silos-Rodríguez, "Manual de Lucha contra la contaminación por hidrocarburos", 1<sup>er</sup> edición. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz. 2008.
- [8] A. B. Salazar-Arriaga and H. Domínguez, "Decane structure on a graphite surface with sodium dodecyl sulfate and betaine surfactant mixtures: A molecular dynamics study", *Chem. Phys.*, 2020, 539, 110945.
- [9] E. H. Chavez-Martínez, E. Cedillo-Cruz, y H. Domínguez, "Adsorption of metallic ions from aqueous solution on surfactant aggregates: a molecular dynamics study", *Condens. Matter Phys.*, 2021, 24, 23601.

# Biomateriales marinos

I. A. Núñez-Tapia<sup>1</sup>, R. M. Jiménez-Jiménez<sup>2</sup>,  
M. C. Piña-Barba<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Materiales,  
Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito  
Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, CDMX, México

<sup>2</sup>Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma  
de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510,  
CDMX, México

[isrant@comunidad.unam.mx](mailto:isrant@comunidad.unam.mx)

## Introducción

Podemos definir un biomaterial como cualquier material utilizado para fabricar dispositivos médicos que se implantan para reemplazar una parte o una función de cierto organismo vivo, de una forma segura, confiable y fisiológicamente aceptable [1]. Es decir, no debe producir ningún tipo de toxicidad y debe llevar a cabo su tarea de forma óptima. Los biomateriales pueden clasificarse según su origen como naturales o sintéticos.

Algunos ejemplos de biomateriales de origen natural son la seda, celulosa, hule y quitosano, entre otros. También las proteínas como el colágeno, elastina y fibrina son consideradas biomateriales. En la figura 1 se observa que los biomateriales naturales pueden clasificarse de acuerdo con su origen como marinos y terrestres.

Un ejemplo trascendente en la salud humana es el Lisado de Amebocitos de *Limulus* [2], el cual detecta endotoxinas bacterianas (cuya presencia en ciertos organismos produce fiebre, alteraciones vasculares inflamatorias, activación de la coagulación, entre otras patologías). Estas endotoxinas son lipopolisacáridos presentes en la pared celular de bacterias como la *Salmonella*, *E. coli*, *Shigella* y *Pseudomonas*.

Dicho lisado proviene del cangrejo herradura (el cual es considerado un fósil viviente) que habita los mares desde hace

aproximadamente 250 millones de años y sirve para evaluar la esterilidad, toxicidad e inocuidad de medicamentos, implantes, prótesis, cosméticos, etc.



**Figura 1.** Clasificación de los biomateriales naturales según su origen

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, nuestro país cuenta con aproximadamente 11 000 Km de litoral en el Océano Pacífico, 8 475 Km en el Golfo y 3 117 Km en el Mar Caribe. En todos estos kilómetros de costa conviven regiones turísticas, puertos industriales y 68 regiones marinas protegidas. Una explotación de todos estos recursos naturales, basada en el desarrollo sustentable y en la investigación de nuevos materiales, propicia el desarrollo económico y tecnológico del país.

La mayoría de personas familiarizadas con el concepto de biomateriales marinos pensaría de inmediato en los ejemplos de la quitina y el quitosano, pues son los polisacáridos de origen marino más estudiados, conocidos y aplicados en el campo de la ciencia de materiales. A continuación, presentamos un breve resumen de cada uno de estos materiales de origen marino.

## Quitina y quitosano

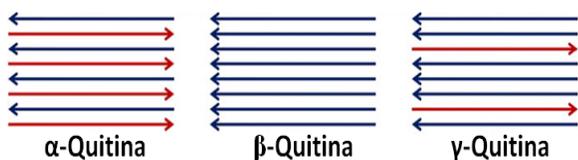
La quitina es el segundo polímero de origen natural más abundante. Funciona como componente estructural del exoesqueleto de varios invertebrados marinos y terrestres. Se encuentra formada por enlaces  $\beta$ -(1,4) de unidades N-acetil-d-glucosamina presentando tres estructuras polimórficas: la  $\alpha$ -quitina corresponde a una celda ortorrómbica formada por láminas paralelas y antiparalelas, alternadas entre sí; la  $\beta$ -quitina presenta cadenas de polisacáridos que están dispuestos en forma paralela, y la

$\gamma$ -quitina tiene una disposición de dos hojas paralelas y una antiparalela. De todas estas estructuras, la mayoría de las quitinas naturales presentan la forma alfa [3] (Fig. 2a). El proceso de extracción de quitina consta de 3 pasos:

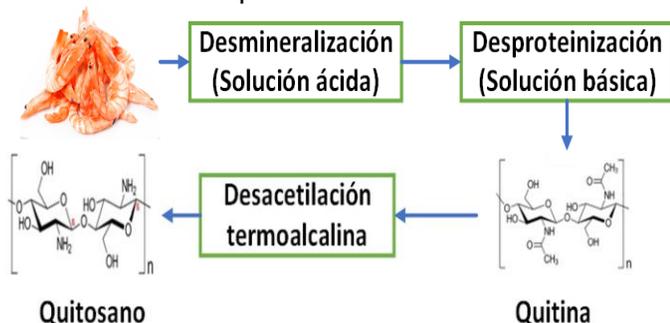
1. La eliminación de proteínas propias del tejido de los invertebrados. Para realizarlo se emplea una solución acuosa alcalina.
2. Eliminación de la capa biomineral que revisten el exoesqueleto de las especies marinas (principalmente hidroxapatita y carbonatos de calcio) haciendo uso de una solución ácida.
3. La extracción final se realiza mediante un tratamiento alcalino a temperaturas de 50-80 °C.

Cabe hacer notar que el camarón o gamba constituye la fuente más importante para la obtención de quitina. El rendimiento dependerá del tipo de especie, habiendo más de 300 especies diferentes en el mundo (Fig. 2b).

**a) Estructuras presentes de manera natural en la quitina**



**b) Método de obtención de quitosano**



**Figura 2a.** Tipos de quitinas presentes de manera natural. **2b.** método de obtención de quitosano

La quitina posee características excepcionales de biocompatibilidad, bioactividad, biodegradabilidad y alta resistencia mecánica, pero su escasa solubilidad dificulta la aplicación en el campo médico [4]. Este problema se soluciona al transformar (química o enzimáticamente) la quitina en quitosano. La conversión química es la más idónea de las dos, debido a su bajo coste.

La reacción química empleada en la obtención de quitosano es conocida como desacetilación. Implica tratar a la quitina con una solución básica (la temperatura de operación y concentración de la solución básica son factores determinantes para el peso molecular y grado de desacetilación). El copolímero obtenido está formado por d-glucosamina y N-acetil-d-glucosamina, unidas por enlaces glucosídicos (1,4). A la relación presente entre ambas unidades se le conoce como grado de desacetilación.

Cuando el grado de desacetilación alcanza el 50 %, el quitosano se vuelve soluble en medios acuosos ácidos [5], debido a que los grupos amino presentes en la cadena se protonan convirtiendo al quitosano en el único polisacárido catiónico de origen marino. Dicha carga positiva interacciona con las cargas negativas presentes en las membranas celulares de algunos patógenos, esta interacción eléctrica puede explicar sus propiedades antimicrobianas [6].

El quitosano en medio ácido puede presentarse como nanofibras, hidrogeles y espumas, las cuales pueden ser combinadas con múltiples polímeros naturales o sintéticos.

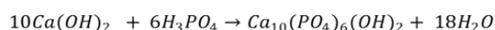
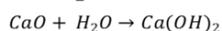
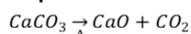
## Hidroxiapatita

La hidroxiapatita pertenece a la familia de los fosfatos de calcio y se encuentra presente en las espinas y escamas de los peces. La alta disponibilidad de materia prima propia de la producción pesquera [7] hacen a este tipo de residuos altamente atractivos para la obtención de hidroxiapatita. Los métodos de obtención de hidroxiapatita de origen marino pueden agruparse en procesos de precipitación, hidrotermal, tratamiento alcalino y calcinación (figuras 3a, 3b, 3c y 3d).

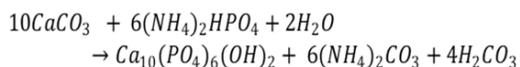
El objetivo principal del método de precipitación es aprovechar la composición de más del 90 % de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) presente en las conchas, cangrejos y mejillones. Para ello, la materia prima es limpiada (generalmente por sonicación) para luego ser triturada en un molino de bolas, luego se calina entre 800-900 °C para eliminar la materia orgánica. El CaCO<sub>3</sub> es tratado (generalmente con ácido fosfórico, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) para la obtención de hidroxiapatita. El método hidrotermal es empleado principalmente en las esponjas y corales marinos, los cuales son ricos en CaCO<sub>3</sub>. La ventaja del método radica en que el producto final conserva la morfología propia de estos organismos, proveyendo un andamio de alta porosidad. Al producto se le suele denominar hidroxiapatita coralina.

El método de tratamiento alcalino y calcinación se enfoca en obtener hidroxiapatita, utilizando como materia prima las espinas y escamas de diferentes pescados. Estas son lavadas con agua y luego se eliminan las proteínas no colágenas con ácidos y sales metálicas. Al final se calcinan a temperaturas mayores a 800 °C. Debido a que la micro y la macroestructura de las escamas responden de maneras diferentes a algunos tratamientos alcalinos, es conveniente identificar el tipo de escama que se trabaja.

**a) Método de precipitación**



**b) Método hidrotermal**



**c) Método de tratamiento alcalino y calcinación**



**d) Tipos de escamas**



**Figura 3a.** El método de precipitación generalmente parte de exoesqueletos de especies marinas como caracoles, cangrejos o almejas. **3b.** El método hidrotermal aprovecha la arquitectura porosa de algas y esponjas marinas. **3c.** El método de tratamiento alcalino suele emplear a la hidroxiapatita presente en los huesos y escamas de pescado. **3d.** Diferentes tipos de escamas presentes en peces.

## Biomateriales obtenidos de algas

Las algas marinas son un importante productor primario dentro de la cadena trófica marina y se encuentran formadas por glicosaminoglicanos (como agar, alginatos, carragenanos, ulvanos, fucoidanos).

Tienen innumerables aplicaciones biomédicas y farmacológicas, como antioxidantes, antitumorales, anticoagulantes e incluso, investigaciones actuales, les asocian propiedades antivirales [8].

Existen diferentes técnicas de extracción. Estas dependen principalmente de si la macromolécula objetivo se encuentra dentro o fuera de la pared celular (es decir, si son polisacáridos intra o extracelulares). Por lo general, se emplean soluciones alcalinas y enzimáticas, estas metodologías de extracción buscan mantener las propiedades intrínsecas de estos polisacáridos marinos.

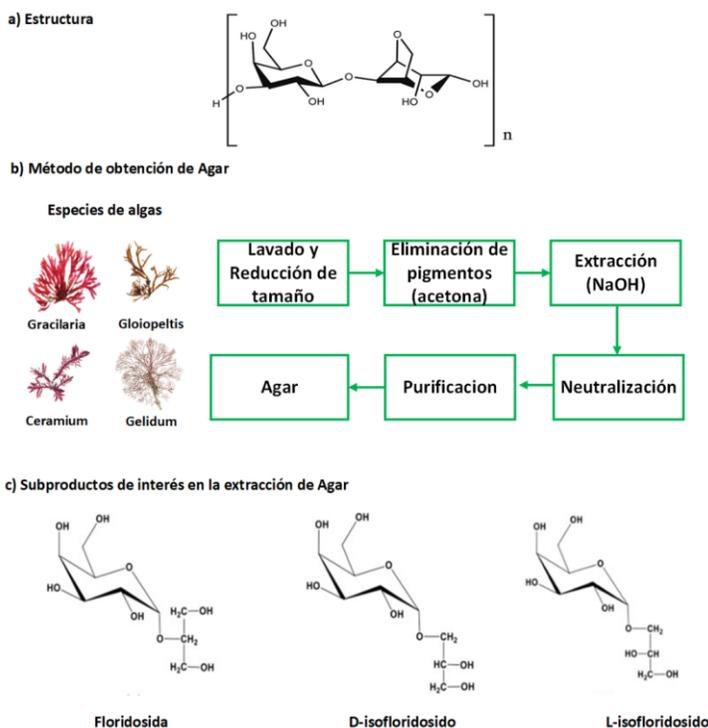
## Agar

La palabra “agar” viene del malayo *agar-agar*, que significa jalea. El agar se deriva del polisacárido agarosa, que forma la estructura de soporte en las paredes celulares.

El agar se considera una mezcla heterogénea de dos clases de polisacáridos: agarpectina y agarosa. Ambas clases de polisacáridos comparten la misma estructura básica, estando formadas por unidades alternadas de D-galactosa y de 3,6-anhidro-L-galactopiranosas, unidas por enlaces α-(1-3) y β-(1-4) [9] (figura 4a).

La extracción de agar a partir de algas marinas (*Gelidium*, *Ceramium*, *Gracilaria* y *Gloiopeltis*) inicia con la limpieza de las algas y la reducción de su tamaño, para después, ser puestas en contacto con soluciones básicas inferiores al 5 % de NaOH [10]. Es necesario neutralizar el producto obtenido con ácidos fuertes, y para eliminar los remanentes salinos formados durante la neutralización se pueden llevar a cabo lavados o diálisis.

El rendimiento puede variar dependiendo el tipo de alga empleada, así como las condiciones de extracción (figura 4b). El mercado global del agar asciende a más de 200 millones de dólares anuales y aumenta año con año. Debido a esto, algunas investigaciones buscan dar valor agregado a los extractos alcalinos generados como residuos propios del método industrial de obtención del agar. Estos subproductos de interés comercial (como la floridosida, D-Isofloridosido y L-Isofloridosido) son conocidos como carbohidratos de bajo peso molecular y se están estudiando sus propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y estimulantes del crecimiento óseo [11] (figura 4c).



**Figura 4a.** Estructura química básica del agar.  
**4b.** Método de obtención de agar empleando algas pardas.  
**4c.** Subproductos de alto potencial en ingeniería de tejidos obtenidos de la producción del agar.

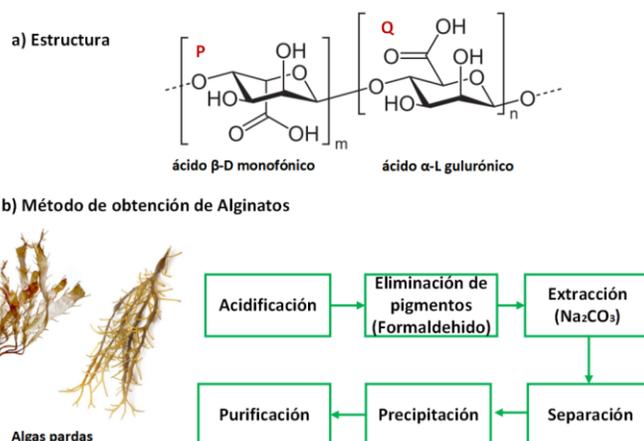
## Alginatos

Los alginatos son sales del ácido algínico, que forman parte de la pared celular y de las regiones intercelulares de las *feofitas* (algas pardas). En su estado natural, se encuentran formando geles con los iones  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Sr}^{+2}$  y  $\text{Ba}^{+2}$ . Desde el punto de vista químico, los alginatos son polímeros lineales compuestos por bloques de residuos de ácido  $\beta$ -D manurónico (P) y  $\alpha$ -L ácido gularónico (Q) unidos por enlaces glicosídicos (1-4) [12] (figura 5a).

La obtención de alginatos a partir de las algas pardas consta de las siguientes etapas: limpieza, reducción de tamaño, eliminación de pigmentos, extracción, separación, precipitación, purificación y secado (Fig. 5 b). Por lo general, los alginatos se extraen como alginato de sodio. Debido a su nula toxicidad e inmunogenicidad (y que presentan buena biocompatibilidad), los alginatos tienen un gran potencial para aplicaciones farmacéuticas y biomédicas.

Para obtener materiales con las propiedades óptimas que se buscan al emplearlos en diversas aplicaciones, las cadenas poliméricas presentes en los diferentes tipos de alginatos son

reticuladas, generalmente con  $\text{Ca}^{2+}$  (reticulación iónica), mediante la asociación entre cationes multivalentes y los bloques gularónicos presentes en los alginatos.



**Figura 5a.** Estructura química básica de los alginatos.  
**5b.** Algas pardas o *fiofitas* empleadas en la producción del agar.

El alginato en su estado natural se encuentra formando geles con iones  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Sr}^{+2}$  y  $\text{Ba}^{+2}$ . De todos estos cationes, el ion  $\text{Ca}^{+2}$  es el principal catión utilizado en la gelificación del alginato, debido a que es considerado como clínicamente seguro, de fácil acceso y económico [13].

Los grupos carboxilo e hidroxilo presentes en la cadena de los alginatos se pueden unir mediante reacciones de esterificación (reticulación covalente), empleando agentes químicos como pueden ser el glutaraldehído, la carbodiimida (EDC) y también la N-hidroxisuccinimida (NHS). Así se mejoran las propiedades y la estabilidad mecánica de los alginatos (proveyendo así, la posibilidad de nuevas aplicaciones).

## Fucoidanos

Los fucoidanos se encuentran principalmente en el talo de las algas pardas y tienen como función brindar estabilidad mecánica y evitar la pérdida de agua durante la marea baja. Existen más de 1 500 especies de algas pardas [14], la mayoría de estas se encuentran en la región conocida como el mar de los sargazos (ubicada en el océano atlántico), ecosistema que sirve como protección a la fauna marina.

La modificación de las corrientes marinas debido al cambio climático ocasiona que grandes cantidades de algas lleguen a las regiones costeras, causando la muerte de múltiples especies marinas. Aprovechar estos residuos orgánicos es un tema muy

complejo, ya que implica conocer la estructura química, la composición y los mecanismos de extracción, purificación y modificación de esta materia prima.

Debido a la complejidad estructural de las algas [15], aún no existe una buena clasificación para estos biopolímeros de origen marino. Actualmente se suelen llamar como:

- Fucanos, formados principalmente por residuos de fucosa y sulfatos.
- Galactofucanos, que se caracterizan por tener residuos de galactosa, fucosa, y sulfatos.
- Glucuronofucanos (o fucoglucuronomananos), que están formados por fucosa, manosa, sulfatos y residuos de ácidos urónicos.
- Heteropolisacáridos (o fucoidanos complejos), que se caracterizan por tener entre cinco o más componentes, como pueden ser: fucosa, galactosa, manosa, xilosa, glucosa, arabinosa, residuos de ácidos urónicos y sulfatos.

Dentro de esta clasificación debemos destacar a los galactofucanos (conocidos también como fucoidanos biológicamente activos) ya que son empleados en diversas aplicaciones de tipo médico.

La obtención y caracterización de cada fucoidano varía según la región geográfica de dónde se obtienen las algas y el tipo de materia prima empleada; por lo que presentar un método de extracción es un tema complejo y fuera del alcance del presente trabajo.

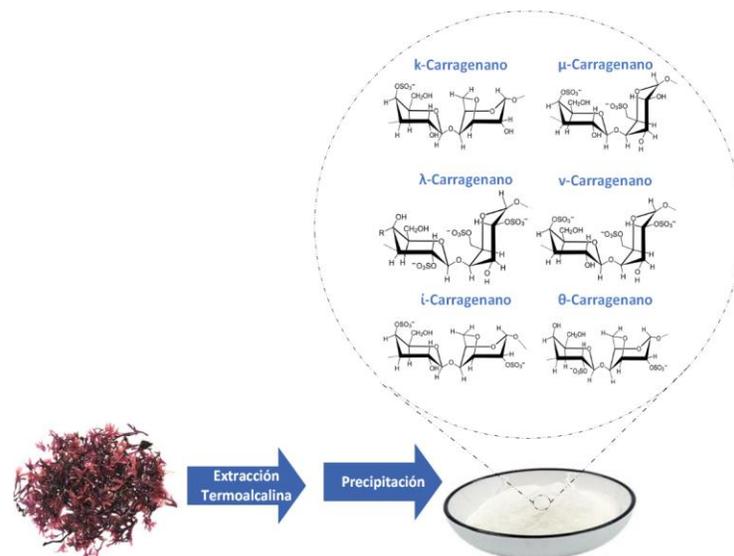
## Carragenanos

El alga tradicional de la cual se obtiene el carragenano se conoce como “musgo irlandés” y es empleada para la fabricación de postres. El nombre carragenano hace referencia al lugar de Carrageen, en el condado de Waterford, Irlanda. El alga suele encontrarse en las regiones frías de las costas del atlántico norte y la función de los carragenanos (junto con la celulosa presente en las algas) es la de proporcionar firmeza y también la de propiciar un mejor anclaje al lecho marino.

Desde el punto de vista químico, los carragenanos suelen clasificarse según la posición del grupo sulfato, nombrándose,  $\kappa$  (kappa),  $\lambda$  (lambda),  $\iota$  (iota),  $\mu$  (mu),  $\nu$  (nu), y  $\theta$  (theta) [16]. Todos están compuestos por unidades alternas de d-galactosa y 3,6-anhidrogalactosa, unidas por enlaces

glicosídicos  $\alpha$  (1-3) y  $\beta$  (1-4), con un peso molecular entre 200 y 800 kDa [17].

Los carragenanos se extraen de diversas especies de algas rojas mediante un tratamiento termoalcalino, seguido de la precipitación con etanol. El polisacárido obtenido puede presentar forma de placas o polvos translúcidos (figura 6).



**Figura 6.** Extracción de los carragenanos empleando como materia prima algas rojas, por lo general, el producto obtenido es una mezcla de diferentes carragenanos.

Los carragenanos son biocompatibles, biodegradables y no son tóxicos ni inmunogénicos (es decir, no provocan una respuesta inmunitaria); por lo cual pueden ser empleados en diversas aplicaciones médicas.

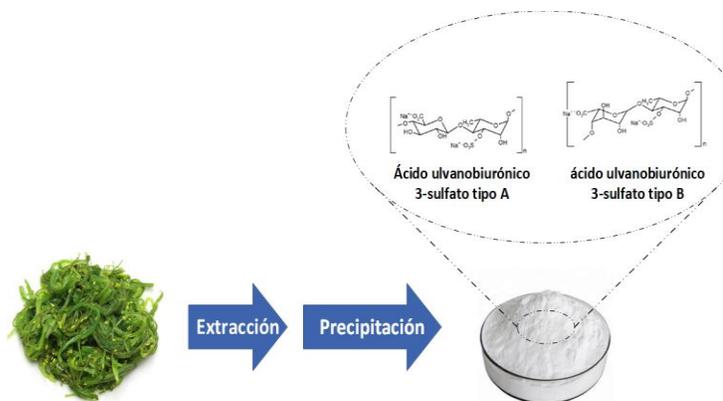
Algunos expertos estiman que el mercado mundial de los carragenanos rebasará los 1.25 millones de dólares para el año 2024, y se seguirá incrementando paulatinamente [18].

## Ulvanos

Los ulvanos son polisacáridos solubles en agua extraídos de la pared celular de las algas verdes, las cuales suelen consumirse como alimento debido a su bajo contenido de carbohidratos, pero alto valor nutricional en vitaminas, aminoácidos esenciales y minerales. Desde el punto de vista químico, los ulvanos presentan una estructura compleja debido a no poseer un grupo monomérico repetitivo predominante, pero generalmente se encuentran formados por cierto porcentaje de ramnosa (17-45 %), sulfato (14-23 %), ácido glucurónico

(7-19 %), xilosa (2-12 %), ácido idurónico (1-9%) y unidades de glucosa (1-7 %) [19]. Su peso molecular oscila entre 200 y 8 200 kDa [20].

El proceso de obtención inicia con la reducción de tamaño de la materia prima, y la extracción suele hacerse con agua a temperatura ambiente o por debajo de los 100 °C. La precipitación de los ulvanos obtenidos se hace con etanol y se obtiene un polvo esponjoso [21] (figura 7).



**Figura 7.** Extracción de ulvanos empleando como materia prima algas verdes, el producto obtenido por lo general es una mezcla de diferentes ulvanos

Podemos considerar a los ulvanos como materiales inteligentes, debido a que responden a estímulos externos, por ejemplo, a pH ácido. Los ulvanos suelen plegarse y presentar una viscosidad baja. A pH alcalino, la ramosa responsable de la hidrofobicidad en los ulvanos adopta una estructura abierta, que conduce a viscosidades altas. Todas estas propiedades hacen a los ulvanos materiales interesantes para aplicaciones biomédicas y cosméticas [22].

## Gelatina y colágeno

El colágeno es la proteína más abundante en los mamíferos (~30 % de la masa proteica total). La superfamilia de los colágenos comprende, hasta ahora, 28 miembros numerados del I al XXVIII [23].

La gelatina es un polímero constituido por aminoácidos (donde la glicina, prolina e hidroxiprolina aportan más del 50 % de la composición total) [24]. Se obtiene a partir de una hidrólisis del colágeno. Podemos resumir las diferencias entre el colágeno y la gelatina en la tabla I.

## Algunas aplicaciones de los materiales marinos

Todos los materiales mencionados con anterioridad son aplicables a diferentes industrias, como la alimenticia. Allí los derivados del colágeno (gelatina) y los carragenanos (carragenina) son ampliamente utilizados para dar cuerpo a diferentes salsas, cremas, postres, etc.

En la acción antibacterial y antiviral destacan la quitina y el quitosano, los polímeros de origen marino más estudiados y aplicados en este campo. Con el advenimiento de la pandemia de Covid-19, algunos estudios sugieren que nanopartículas de quitina y quitosano [28], e incluso los ulvanos y carragenanos, poseen la capacidad de combatir el virus SARS-CoV-2 bajo ciertas condiciones que son muy particulares. Estos, al ser biocompatibles, son eliminados por el organismo de manera natural. El cáncer es una de las principales causas de muerte en el mundo, por lo que la búsqueda de tratamientos que curen o aumenten la calidad de vida de los enfermos es un tema actual de investigación mundial y en este campo los biomateriales de origen marino también presentan una alternativa interesante.

Propiedad o característica	Colágeno	Gelatina
<b>Estructura</b>	La triple hélice está formada por tres cadenas $\alpha$ , cada cadena alfa está compuesta por ~ 1 014 amino ácidos, con un peso molecular de alrededor de 100 kDa. La estructura de las cadenas $\alpha$ varía desde el 96 % para el colágeno tipo I, hasta menos del 10 % de colágeno tipo XII [25] [26].	La gelatina proviene de la desnaturalización del colágeno y está compuesta por las cadenas de tipo $\alpha$ de la colágena.
<b>Obtención</b>	Se obtiene principalmente de tendones y piel de mamíferos.	Se obtiene a partir de huesos y pieles de mamíferos y peces. También se obtiene de la desnaturalización del colágeno

**Tabla I.** Cuadro comparativo entre colágeno y gelatina

El alginato es empleado en el desarrollo de micelas (compuestas por alginato-cúrcuma), mostrando nula toxicidad contra células sanas y logrando la reducción del tamaño de tumores en un modelo animal [29]. En ensayos con líneas celulares de adenocarcinoma humano de mama se reporta la disminución del número de células cancerosas al estar en contacto con nanoestructuras de alginato-cobre [30]. Otros estudios de compuestos alginato-quitosano-nanopartículas de plata mostraron actividad anticáncer [31].

Los fucoidanos (que pueden ser extraídos del sargazo) han sido utilizados en diversos estudios como tratamiento contra el VIH/SIDA presentando actividad inhibitoria del virus de la inmunodeficiencia humana. Dichos polisacáridos marinos no presentan actividad citotóxica contra células sanguíneas humanas [32], lo cual abre una amplia gama de posibles tratamientos antirretrovirales de nueva generación.

En el campo de la ingeniería de órganos y tejidos, los biomateriales marinos son ampliamente utilizados en el desarrollo de andamios por diferentes técnicas, electrohilado, liofilización, evaporación de disolvente y manufactura aditiva (impresión 3D). Para la elaboración de tales andamios se emplean colágenos, alginatos, quitosanos y gelatinas de origen marino, que presentan una aceptable biocompatibilidad. La deficiencia mecánica de los andamios obtenidos a partir de biomateriales marinos es subsanada al combinarlos con polímeros sintéticos biocompatibles como PLA, PCL, PLGA [33]. Podemos resumir algunas aplicaciones de estos biomateriales de origen marino en la figura 8.



Figura 8. Algunas aplicaciones de los biomateriales marinos

## Conclusión

Los biomateriales no solo buscan conocer la relación entre la estructura y las propiedades propias del material, sino también estudiar la interacción entre los materiales y el organismo del huésped.

Estos materiales se utilizan a menudo en aplicaciones biomédicas, liberación de fármacos e ingeniería de órganos y tejidos. Si el material proviene de una fuente marina natural le podemos llamar biomaterial marino. Se estima que más del 80 % de los mares se encuentran inexplorados (y no podemos valorar algo que desconocemos). Es necesario desarrollar más métodos de obtención de biomateriales bioactivos de origen marino. Estos procedimientos deben buscar obtener materiales de grado médico capaces de ser empleados en humanos. Para esto es necesario la generación de nuevo conocimiento, desde la divulgación, exploración y preservación de los océanos, haciendo un uso razonable de los recursos de nuestros mares.

## Agradecimientos

Queremos agradecer a la DGAPA UNAM, por el financiamiento otorgado a través de los Proyectos PAPIIT IT100719 y IT100222.

## Referencias

- [1] J. D. Bronzino, *Biomaterials: Principles and applications*. 2002.
- [2] J. F. Cooper, J. Levin, y H. N. Wagner, "Quantitative comparison of in vitro and in vivo methods for the detection of endotoxin.", *J. Lab. Clin. Med.*, vol. 78, n° 1, pp. 138–48, jul. 1971, [En línea]. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4936365>.
- [3] I. Hamed, F. Özogul, y J. M. Regenstien, "Industrial applications of crustacean by-products (chitin, chitosan, and chitooligosaccharides): A review", *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 48, pp. 40–50, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.11.007>.
- [4] N. Sayari et al., "Chitin and chitosan from the Norway lobster by-products: Antimicrobial and anti-proliferative activities", *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 87, pp. 163–171, jun. 2016, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2016.02.057.
- [5] K. L. B. Chang, G. Tsai, J. Lee, y W.-R. Fu, "Heterogeneous N-deacetylation of chitin in alkaline solution", *Carbohydr. Res.*, vol. 303, n° 3, pp. 327–332, sep. 1997, doi: 10.1016/S0008-6215(97)00179-1.
- [6] P. Cazón, G. Velazquez, J. A. Ramírez, y M. Vázquez, "Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: A review", *Food Hydrocoll.*, vol. 68, pp. 136–148, jul. 2017, doi: 10.1016/j.foodhyd.2016.09.009.
- [7] P. Shi, M. Liu, F. Fan, C. Yu, W. Lu, y M. Du, "Characterization of natural hydroxyapatite originated from fish bone and its

biocompatibility with osteoblasts”, *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 90, pp. 706–712, sep. 2018, doi: 10.1016/j.msec.2018.04.026.

[8] N. Hans, A. Malik, y S. Naik, “Antiviral activity of sulfated polysaccharides from marine algae and its application in combating COVID-19: Mini review”, *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 13, p. 100623, feb. 2021, doi: 10.1016/j.biteb.2020.100623.

[9] F. S. Mostafavi y D. Zaeim, “Agar-based edible films for food packaging applications - A review”, *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 159, pp. 1165–1176, sep. 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.05.123.

[10] V. Kumar y R. Fotedar, “Agar extraction process for *Gracilaria cliftonii* (Withell, Millar, & Kraft, 1994)”, *Carbohydr. Polym.*, vol. 78, n° 4, pp. 813–819, nov. 2009, doi: 10.1016/j.carbpol.2009.07.001.

[11] Y.-X. Li, Y. Li, S.-H. Lee, Z.-J. Qian, y S.-K. Kim, “Inhibitors of Oxidation and Matrix Metalloproteinases, Floridoside, and -Isofloridoside from Marine Red Alga *Laurencia undulata*”, *J. Agric. Food Chem.*, vol. 58, n° 1, pp. 578–586, ene. 2010, doi: 10.1021/jf902811j.

[12] Z. Belattmania *et al.*, “Isolation and FTIR-ATR and <sup>1</sup>H NMR Characterization of Alginates from the Main Alginophyte Species of the Atlantic Coast of Morocco”, *Molecules*, vol. 25, n° 18, p. 4335, sep. 2020, doi: 10.3390/molecules25184335.

[13] C. P. Reis, R. J. Neufeld, S. Vilela, A. J. Ribeiro, y F. Veiga, “Review and current status of emulsion/dispersion technology using an internal gelation process for the design of alginate particles”, *J. Microencapsul.*, vol. 23, n° 3, pp. 245–257, ene. 2006, doi: 10.1080/02652040500286086.

[14] A. Zayed y R. Ulber, “Fucoidans: Downstream Processes and Recent Applications”, *Mar. Drugs*, vol. 18, n° 3, p. 170, mar. 2020, doi: 10.3390/md18030170.

[15] T. N. Zvyagintseva *et al.*, “Structural diversity of fucoidans and their radioprotective effect”, *Carbohydr. Polym.*, vol. 273, p. 118551, dic. 2021, doi: 10.1016/j.carbpol.2021.118551.

[16] N. A. Chudasama, R. A. Sequeira, K. Moradiya, y K. Prasad, “Seaweed Polysaccharide Based Products and Materials: An Assessment on Their Production from a Sustainability Point of View”, *Molecules*, vol. 26, n° 9, p. 2608, abr. 2021, doi: 10.3390/molecules26092608.

[17] M. Younes *et al.*, “Re-evaluation of carrageenan (E 407) and processed *Eucheuma* seaweed (E 407a) as food additives”, *EFSA J.*, vol. 16, n° 4, abr. 2018, doi: 10.2903/j.efsa.2018.5238.

[18] M. R. F. A. Online, “Global Carrageenan Market”, [En línea]. Disponible en: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/carrageenan-market-704>.

[19] M. Lahaye y A. Robic, “Structure and Functional Properties of Ulvan, a Polysaccharide from Green Seaweeds”, *Biomacromolecules*, vol. 8, n° 6, pp. 1765–1774, jun. 2007, doi: 10.1021/bm061185q.

[20] L. Cunha y A. Grenha, “Sulfated Seaweed Polysaccharides as Multifunctional Materials in Drug Delivery Applications”, *Mar. Drugs*, vol. 14, n° 3, p. 42, feb. 2016, doi: 10.3390/md14030042.

[21] L.-A. Tziveleka, E. Ioannou, y V. Roussis, “Ulvan, a bioactive marine sulphated polysaccharide as a key constituent of hybrid biomaterials: A review”, *Carbohydr. Polym.*, vol. 218, pp. 355–370, ago. 2019, doi: 10.1016/j.carbpol.2019.04.074.

[22] I. Priyan Shanura Fernando, K.-N. Kim, D. Kim, y Y.-J. Jeon, “Algal polysaccharides: potential bioactive substances for cosmeceutical applications”, *Crit. Rev. Biotechnol.*, vol. 39, n° 1, pp. 99–113, ene. 2019, doi: 10.1080/07388551.2018.1503995.

[23] C. Söderhäll *et al.*, “Variants in a Novel Epidermal Collagen Gene (COL29A1) Are Associated with Atopic Dermatitis”, *PLoS Biol.*, vol. 5, n° 9, p. e242, sep. 2007, doi: 10.1371/journal.pbio.0050242.

[24] S. Kommareddy, D. B. Shenoy, y M. M. Amiji, “Gelatin Nanoparticles and Their Biofunctionalization”, en *Nanotechnologies for the Life Sciences*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.

[25] A. León-López, A. Morales-Peñaloza, V. M. Martínez-Juárez, A. Vargas-Torres, D. I. Zeugolis, y G. Aguirre-Álvarez, “Hydrolyzed Collagen—Sources and Applications”, *Molecules*, vol. 24, n° 22, p. 4031, nov. 2019, doi: 10.3390/molecules24224031.

[26] S. Ricard-Blum, “The Collagen Family”, *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.*, vol. 3, n° 1, pp. a004978–a004978, ene. 2011, doi: 10.1101/cshperspect.a004978.

[27] G. Boran y J. M. Regenstein, “Fish Gelatin”, 2010, pp. 119–143.

[28] M. Safarzadeh, S. Sadeghi, M. Azizi, M. Rastegari-Pouyani, R. Pouriran, y M. Haji Molla Hoseini, “Chitin and chitosan as tools to combat COVID-19: A triple approach”, *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 183, pp. 235–244, jul. 2021, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.04.157.

[29] A. Karabasz *et al.*, “Analysis of toxicity and anticancer activity of micelles of sodium alginate-curcumin”, *Int. J. Nanomedicine*, vol. Volume 14, pp. 7249–7262, sep. 2019, doi: 10.2147/IJN.S213942.

[30] H. W. Rüdiger, M. Dreyer, J. Kühnau, y H. Bartelheimer, “Familial insulin-resistant diabetes secondary to an affinity defect of the insulin receptor.”, *Hum. Genet.*, vol. 64, n° 4, pp. 407–111, 1983, doi: 10.1007/BF00292378.

[31] J. Venkatesan *et al.*, “Antimicrobial and anticancer activities of porous chitosan-alginate biosynthesized silver nanoparticles”, *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 98, pp. 515–525, may 2017, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.01.120.

[32] S. Dinesh, T. Menon, L. E. Hanna, V. Suresh, M. Sathuvan, y M. Manikannan, “In vitro anti-HIV-1 activity of fucoidan from *Sargassum swartzii*”, *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 82, pp. 83–88, ene. 2016, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2015.09.078.

[33] Y. Zhang *et al.*, “Biomaterials Based on Marine Resources for 3D Bioprinting Applications”, *Mar. Drugs*, vol. 17, n° 10, p. 555, sep. 2019, doi: 10.3390/md17100555.

# Primer Congreso Estatad de Ciencia e Ingeniería de Materiales 2022

Instituto de Investigaciones en Materiales,  
Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito  
Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, CDMX, México

En esta sección compartiremos con ustedes, lectores de Materiales Avanzados, aquellos trabajos destacados y los tres primeros lugares del concurso de carteles y fotografía científica de la primera emisión del Congreso estatal de ciencia e ingeniería de materiales, en la CDMX.

Manténgase atento de los diferentes cursos, actividades, servicios y congresos organizados por todas las personas que conforman el Capítulo estudiantil del IIM:

<https://capituloestudiantil.iim.unam.mx/>

## Fotografías

Primer lugar: ***El origen de la vida***  
de Diego Arroyo Peralta

Segundo lugar: ***Deshilando la ciencia***  
de Jathziri Avalos Grajales

Tercer lugar: ***Perovskite flowers***  
de Priscila Ivette Román Román

## Carteles

Primer lugar: ***Low pressure vapor transport growth of ZnO nanostructures for sensing applications***  
de Andrés Galdámez Martínez

Segundo lugar: ***O<sub>2</sub> Activation by AuAg clusters on a defective (100)MgO Surface***  
de Carlos Alberto Vital José

Tercer lugar: ***A first approximation to the white light photoluminescence emission obtained by a SiO<sub>x</sub>/a-SiC:H bilayer***  
de Erick Ayala Sánchez

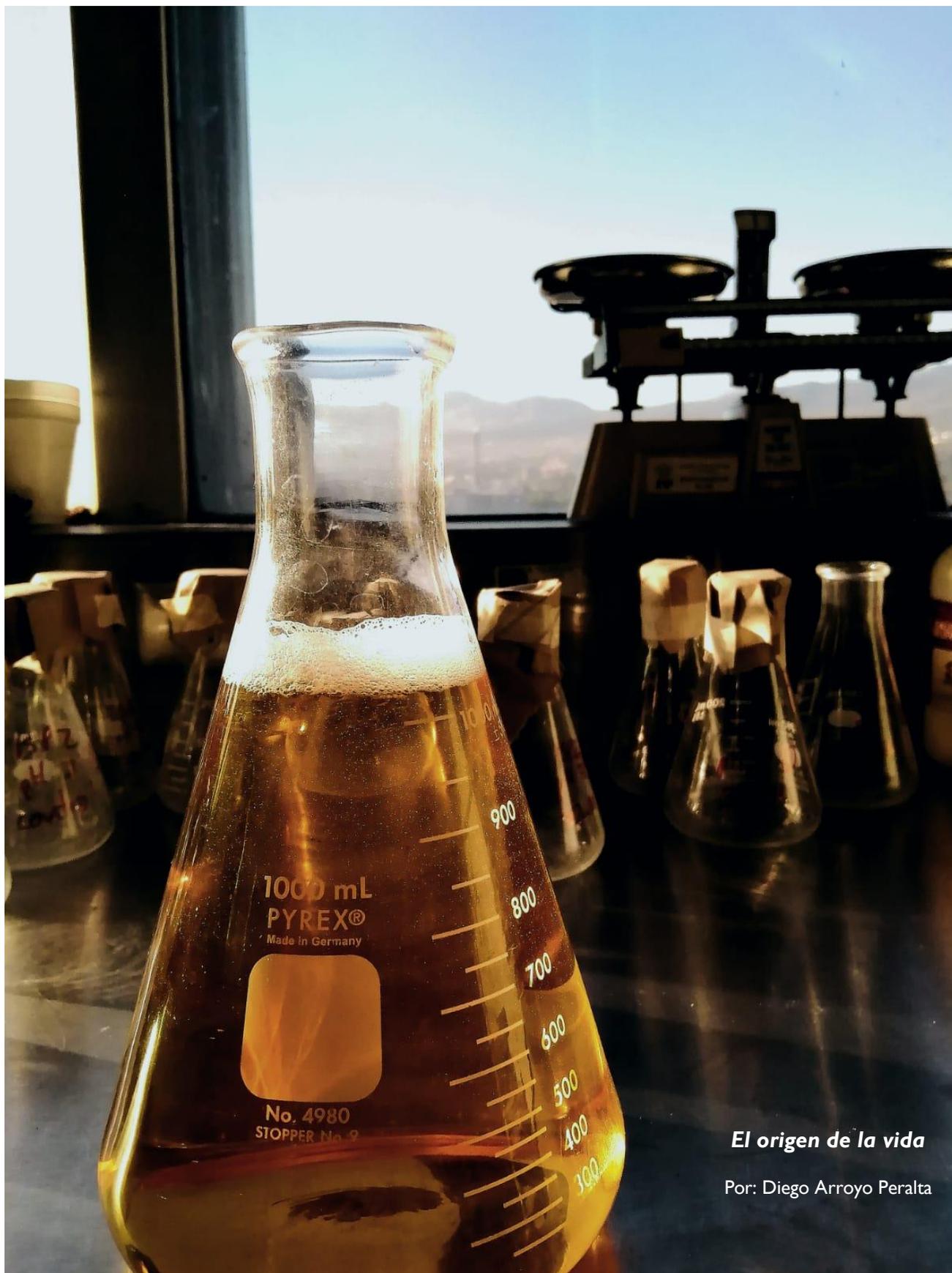
## Textos

Primer lugar:  
***¿Qué le pasa al SARS-Cov-2 en contacto con diferentes superficies?***

Presentado por: Gerardo Gustavo Ramírez Ruiz, Estrella Ramos, Héctor Domínguez y Rodolfo Gómez Balderas

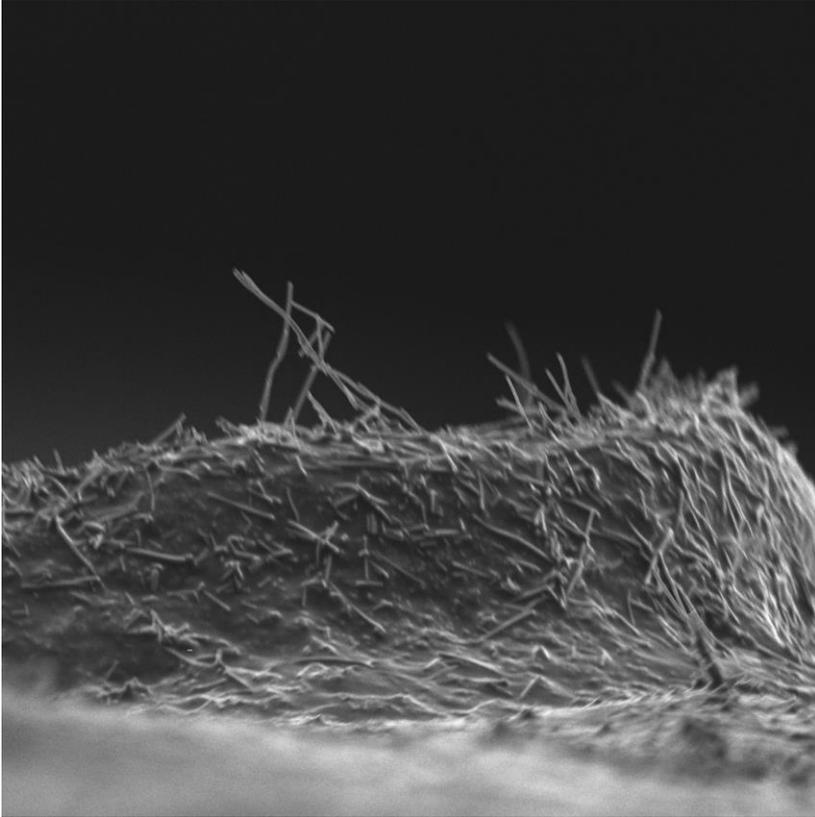
Segundo lugar:  
***Citotoxicidad de híbridos de óxido de hierro con goma arábiga***  
Presentado por: Dulce Guzmán, Mario Eduardo Cano, Jesús Bernal y Teodoro Córdova

Tercer lugar:  
***Perovskitas dobles y libres de plomo: diseñando los materiales fotovoltaicos del mañana***  
Presentado por: Jean Luis Castillo Sánchez, Arnulfo Montoya-Moreno, Álvaro de Jesús Ochoa Calle, Óscar Olvera-Neria

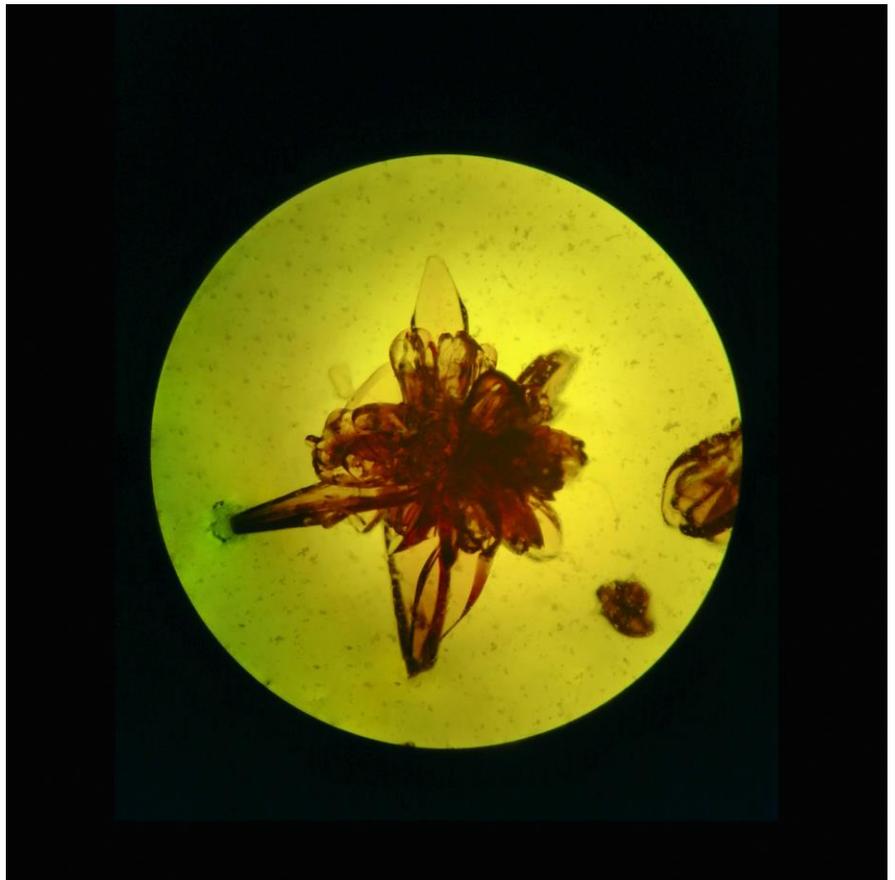


*El origen de la vida*

Por: Diego Arroyo Peralta



***Deshilando la ciencia***  
Por: Jathziri Avalos Grajales



***Perovskite flowers***  
Por: Priscila Ivette Román Román

# Low pressure vapor transport growth of ZnO nanostructures for sensing applications

A. Galdámez-Martínez<sup>1</sup>, M. Gonzales-Garnica<sup>2</sup>, A. Brito<sup>1</sup>, R. Salinas<sup>1</sup>, F. Malagón<sup>1</sup>, G. Santana<sup>1</sup>, T. V. K. Karthik<sup>3</sup> and A. Dutt<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica de Tulancingo

<sup>3</sup>Tepeji Graduate School, Industrial Engineering, UAEH

## Introduction

Recently, the control, prevention, and detection of carbon footprint gases are critical challenges to be addressed shortly. Metal oxides nanostructures have been used to detect CO<sub>2</sub>. 1-D ZnO nanostructures nanowires (NWs) and nanorods (NRs) exhibit low detection limits, high and fast response, as well as good recovery times when incorporated as recognizing elements in gas sensing devices. In the present work, we demonstrate a simple, economic, and time-conserving approach to growing 1-D ZnO nanostructures (NWs/NRs) for their application as a CO<sub>2</sub> gas sensor. A comparison between the morphological, optical, and gas sensing properties of 1-D ZnO nanostructures grown with and without seed layer and with different thicknesses of gold catalysts (2 and 4 nm) in both cases is presented.

## Methodology

1-D ZnO nanostructures were prepared using the Vapor-Liquid-Solid (VLS) technique. Gold coated (2&4 nm) Al:ZnO seed layer films obtained by Ultrasonic Spray Pyrolysis (USP) and silicon wafers (no seed layer: NSL) were used as substrates. A high-temperature furnace at 950°C using a powder mixture of ZnO: C [1:1] as precursors and Ar as a carrier gas was used to perform the growth.

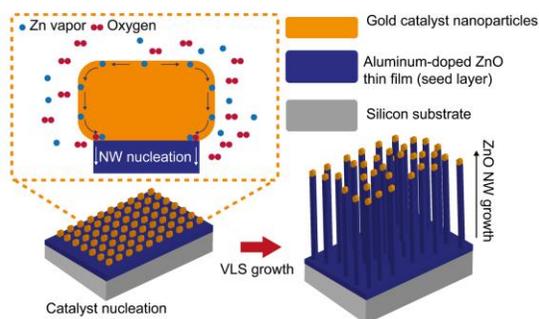


Figure 1. Schematic representation of the VS and VLS growth process for the obtention of 1D ZnO nanostructures.

## Results

Depending on the Au catalyst thickness (2 or 4 nm) variation, the samples were named 1-D USP-Au2 and 1-D NSL-Au2, and 1-D USP-Au4 and 1-D NSL-Au4, respectively. Scanning electron microscopy (SEM) images determine 2.63-4.52 μm and a diameter of 39-87 nm for 2-4 nm Au USP samples. For NSL samples, lower length (1.96-1.59 μm) length and diameter (56-85 nm) were found which can be attributed to lattice mismatch between the substrate and the ZnO nanostructure. The resulting X-ray diffractograms (XRD) found that both USP and NSL samples exhibit a hexagonal ZnO crystal growth.

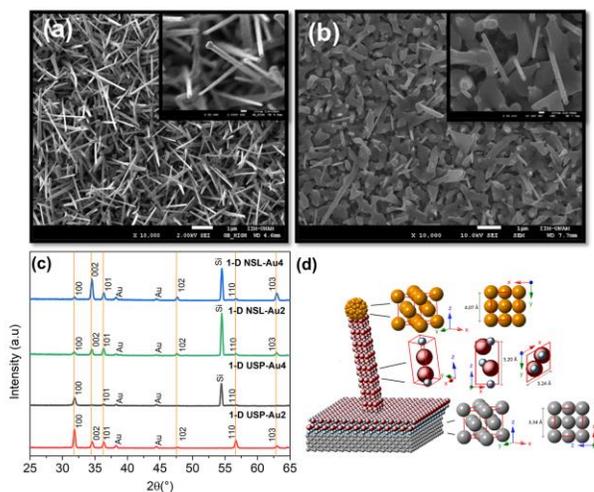


Figure 2. (a-b) SEM micrographs of ZnO 1-D nanostructures. (a) USP seed layer (1-D USP) and (b) NSL grown nanostructures (1-D NSL) with 4 nm gold catalyst. (c) XRD spectra of the obtained 1-D ZnO nanostructures. (d) Crystal structure representation of the silicon substrate (gray: FCC), ZnO: Al seed layer (red and blue: wurtzite structure), and gold catalyst thin film (yellow: FCC).

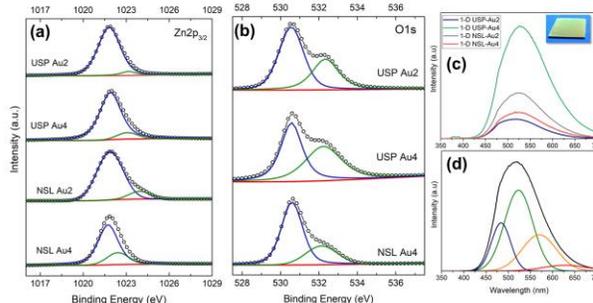


Figure 3. (a) Zn2p<sub>3/2</sub> (b) O1s XPS spectra of VLS grown samples. (c) Room-temperature photoluminescence spectra of the 1-D ZnO materials (Inset: emission from ZnO thin films when excited with a low power Xe lamp). (d) Deconvolution of emission spectra for associating point defects emissions reported in ZnO.

The chemical properties of the 1-D ZnO nanostructures were studied using X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). A shift of the Zn2p<sub>3/2</sub> and O1s peaks to higher energies has been explained as the result of oxygen vacancies (V<sub>O</sub>) in the ZnO matrix. Deconvolution of the photoluminescence spectrums using Gaussian curves allows us to associate the intense green emission (2.31-2.37 eV), with V<sub>O</sub>.

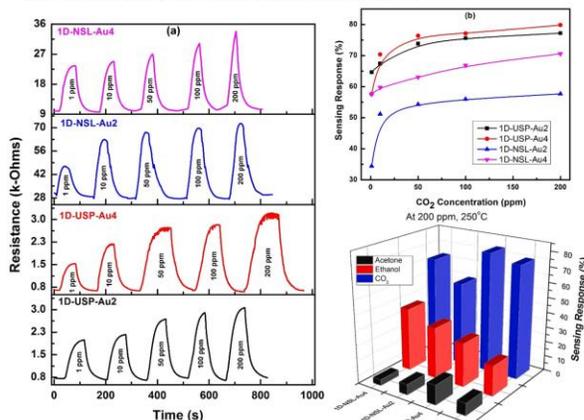


Figure 4. (a) Dynamic responses of all samples with different concentrations of CO<sub>2</sub>, (b) Sensing response of each sample to CO<sub>2</sub> concentration. (c) Gas response of ZnO samples to various gases with concentrations of 200 ppm at 250 °C.

The gas sensing response of the materials increases with an increase in gas concentration and tends to saturate for higher concentrations for all samples. It is well-known that the sensing response directly depends on the amount of oxygen vacancies on the semiconductor surface. For NSL films, the structures without interconnections made the surface more resistive and thus less responsive. The cross sensitivities towards other gases were also tested. All samples show relatively higher sensitivities for CO<sub>2</sub> gas, confirming the selectivity of the samples.

## Conclusion

In this work, the successful obtention of 1-D ZnO nanostructures (NWs/NRs) by the VLS techniques with and without using seed layer is reported. Gas sensing analysis showed that the 1-D ZnO nanostructures with seed layer demonstrated relatively high sensitivity~80%. Therefore, the ZnO based nanostructures obtained in this work can be utilized as CO<sub>2</sub> gas sensors.

## Acknowledgements

AGM thankfully acknowledge CONACyT Grant CVU 860916 and to Lourdes Bazán Díaz [1] Sensors Actuators B Chem. 337 (2021) 129765.



O<sub>2</sub> ACTIVATION BY AuAg CLUSTERS ON A DEFECTIVE (100)MgO SURFACE

Carlos Vital<sup>1</sup>, F. Buendía, A. T. Anzaldo, and M. R. Beltrán

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Materiales UNAM



Instituto de Investigaciones en Materiales

Introduction

In general, the nanoparticles present different properties with respect to bulk materials. Among them, is the origin of the catalytic activity of gold and silver nanoparticles. This is the result of several effects such as the presence of low coordinated atoms, see figure 1 for instance.

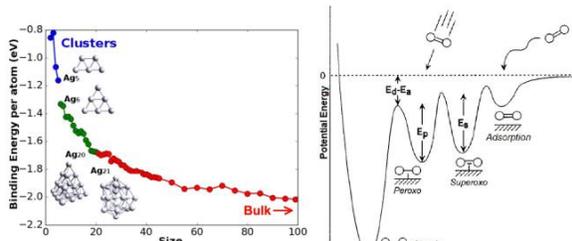


Figure 1: Binding energy per atom with respect to size increase [1].

Figure 2: Potential energy scheme that represents the O<sub>2</sub> states [2].

The oxygen molecule has a characteristic covalent double bond whose binding energy is approximately 5.2 eV, relatively strong. The key step in the oxidation reactions of supported clusters is the molecular adsorption of the O<sub>2</sub> and the subsequent activation of the double bond of the molecule by the charge transferred from the metal on the substrate to the O<sub>2</sub> molecule [3].

Metodology

THE SEARCH FOR MINIMA

We performed an extensive and systematic study of Au<sub>n</sub>Ag<sub>m</sub> (with n + m = 6) on 3 different electronic environments, gas phase, pristine surface, and F-Center surface. The study has been performed using a GA-DFT technique. The program runs in combination with a DFT code called VASP, to perform the minimizations[4,5].

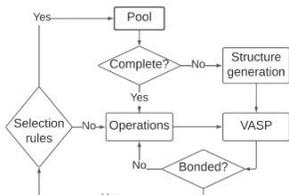


Figure 3: Flow chart of GA technique (MEGA).

THE MODELING OF THE SURFACE

The (100)MgO surface was modeled with a slab of 3 atomic layers. The bottom layer of the surface was fixed to represent the solid. PBEsol was used as DFT functional.

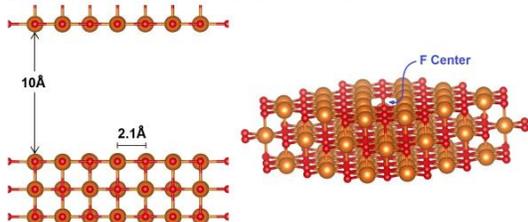


Figure 4: Left, cross-sectional view of the surface. Right, view showing oxygen vacancy.

THE O<sub>2</sub> ADSORPTION

Once the optimal structures, for gas and for the clusters supported in (100)MgO, have been established, the molecule O<sub>2</sub> was deposited.

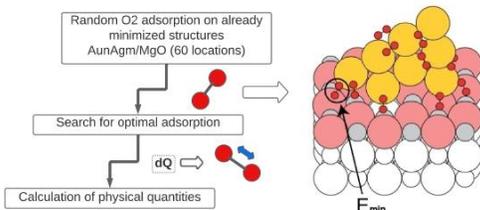


Figure 5: Search for the optimal adsorption of the molecule on the cluster-surface system.

For the charge analysis, the Bader Charge Analysis program of the Henkelman group was used, which calculates on the charge density generated by VASP.

Results

The geometries obtained for each system are presented, as well as the O-O distance and the adsorption energy (related to charge transfer).

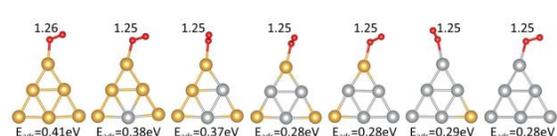


Figure 6: Minima in the gas phase, on the O<sub>2</sub> molecule (red) the bond length (Å) is indicated.

PRISTINE SURFACE

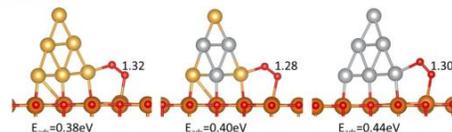


Figure 7: Minima in the pristine surface, on the O<sub>2</sub> molecule (red) the bond length (Å) is indicated.

F-CENTER

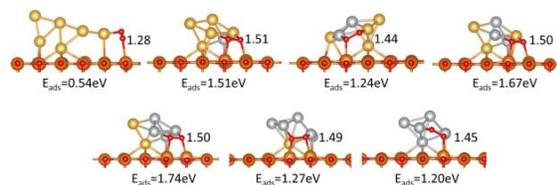


Figure 8: Minima in the F-Center surface, next to the O<sub>2</sub> molecule (red) the bond length (Å) is shown.

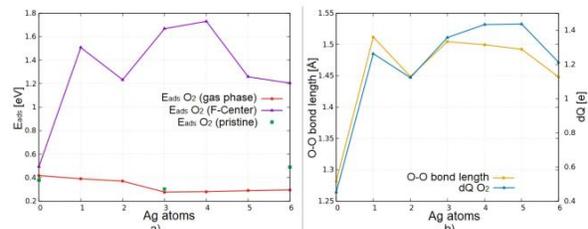


Figure 9: a) E<sub>ads</sub> for 3 different electronic environments, gas phase, pristine surface and F-Center surface. b) O<sub>2</sub> bond length [Å] vs charge transferred dQ [e] for O<sub>2</sub> on cluster-F-center system.

Conclusions

- For the clusters on the gas phase and on the pristine surface, we can observe that the O<sub>2</sub> activation is not favored due to the low capability of these systems to donate enough charge for the process. The charge stolen on its own by O<sub>2</sub> is not enough to preactivate O<sub>2</sub> to a peroxo state (O<sub>2</sub> bond length > 1.48 Å).
- When a defective surface is considered, the surface-cluster system transfers enough charge to promote the oxygen molecule to a peroxo state that debilitates the bond, and therefore, the activation barrier can be easily overcome.
- Summarizing, this study emphasizes the importance of bimetallic clusters over the monometallic ones for catalytic purposes. In this case, these systems combine the capability of the gold atoms to pull charge from a defective surface with that of the silver atoms to yield it to the adsorbed molecule.

References

[1] K. Takahashi, et al. "Data Driven Determination in Growth of Silver from Clusters to Nanoparticles and Bulk", The Journal of Physical Chemistry Letters, vol. 10, 07 2019.  
 [2] P. Nolan, et al. "Molecularly chemisorbed intermediates to oxygen adsorption on Pt (111): A molecular beam and electron energy loss spectroscopy study", The Journal of Chemical Physics, vol. 111, pp. 3696-3704, 08 1999.  
 [3] M. Hayyan, et al. "Superoxide Ion: Generation and Chemical Implications," Chemical Reviews, vol. 116, no. 5, pp. 3029-3085, 2016. PMID: 26875845.  
 [4] A. Vargas, et al. "New Au<sub>n</sub> (n = 27-30) lowest energy clusters obtained by means of an improved DFT-Genetic Algorithm methodology", The JPC C, vol. 121, no. 20, pp. 10982-10991, 2017.  
 [5] F. Buendia, et al. "O<sub>2</sub> activation by AuAg clusters on a defective (100)MgO surface", J. Chem. Phys. 152, 024303, 2020.  
 [6] L. B. Vilhelmsen and B. Hammer, "Systematic Study of Au-6 to Au-12 Gold Clusters on MgO(100) F Centers Using Density Functional Theory", Physicalreview letters, vol. 108, p. 126101, 03 2012.



Ier Congreso Estatal de Ciencia e Ingeniería en Materiales 2022-CDMX-IIM

UNAM



A first approximation to the white light photoluminescence emission obtained by a SiOx/a-SiC: H bilayer

MDS. Erick Ayala Sánchez<sup>1,\*</sup>, Dr. José Álvaro David Hernández de la Luz<sup>1</sup>, Dr. Karim Monfil Leyva<sup>1</sup>, Dr. Mario Moreno Moreno<sup>2</sup>, Ana Luz Muñoz Zurita<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores-ICUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 14 Sur, Cd. Universitaria, Edificio IC5, Col. San Manuel, Puebla, Pue. 72570 México

<sup>2</sup> Coordinación de Electrónica-LNAOE

Luis Enrique Erro 1, Sta. María Tonanzintla, San Andrés Cholula, Puebla, Pue. 72840, México

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 14 Sur, Cd. Universitaria, Edificio FCE1, Col. San Manuel,

BUAP



Abstract

Non-stoichiometric silicon oxide (SiOx) is an emergent material with suitable optical properties to produce photoluminescence (PL) in the red region of the visible spectrum. Hydrogenated amorphous silicon carbide (a-SiC: H) is another interesting material with photoluminescence in the blue region of the visible spectrum. This work shows a study of a SiOx/a-SiC: H bilayer to combine and increase their optical properties to produce white PL.

**Acknowledgements:** Postgraduate Course in Semiconductor Devices (PDS), National Institute of Astrophysics, Optics and Electronics (INAOE) and CONACyT.

Introduction

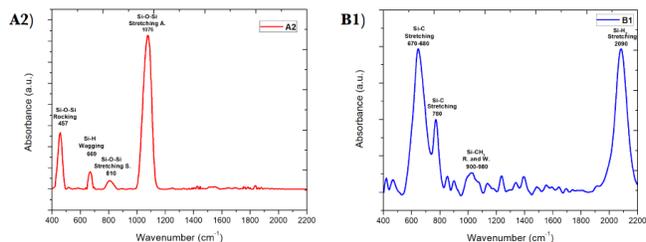
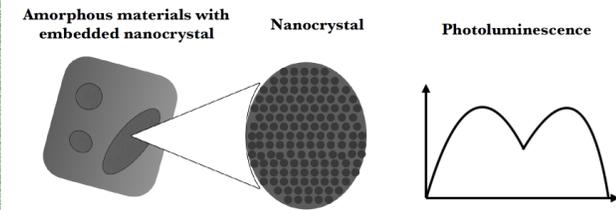


Figure 1. FTIR spectroscopy: A1) SiOx whit Ro= 20, A2) SiOx whit Ro=18.2 and B1) a-SiC:H whit Ro=2.66 [1,2]

Experiment

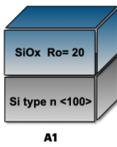
MONOLAYER

Non-stoichiometric silicon (SiOx) by LPCVD

Parameters

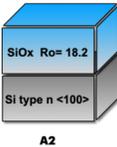
Sample A1:

Substrate: Tipe-n <100>  
Reactor pressure: 1.8 Torr  
Substrate temperature: 725 °C  
Time: 75 minutes  
Flows: N<sub>2</sub>O / SiH<sub>4</sub>  
Ratio: 20



Sample A2:

Substrate: Tipe-n <100>  
Reactor pressure: 1.8 Torr  
Substrate temperature: 725 °C  
Time: 75 minutes  
Flows: N<sub>2</sub>O / SiH<sub>4</sub>  
Ratio: 18.2

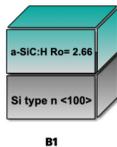


Samples A1 and A2 had two thermal annealing at 1000 °C in N<sub>2</sub> for 30 minutes + 1100 °C in N<sub>2</sub> for 180 minutes.

Amorphous silicon carbide hydrogen (a-SiC:H) by PECVD

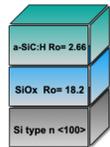
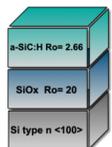
Sample B1:

Substrate: Tipe-n <100>  
Reactor pressure: 0.7 Torr  
RF: 13.56 MHz  
Substrate temperature: 150 °C  
Power: 12 Watts  
Time: 15 min.  
Flows: CH<sub>4</sub> / SiH<sub>4</sub>  
Ratio: 2.66



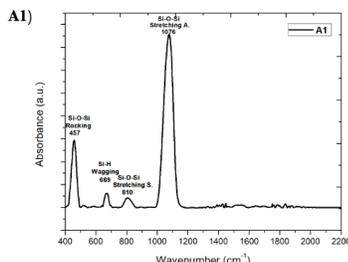
BILAYER

With obtained two different SiOx/ a-SiC:H bilayers.



Result and analysis

FTIR spectroscopy



Photoluminescence spectroscopy

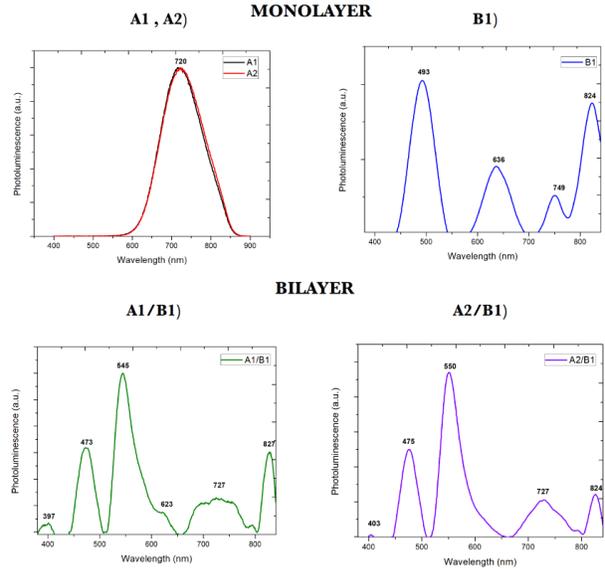


Figure 2. Photoluminescence monolayer: SiOx A1 and A2 red emission, B1) a-SiC:H green emission. Photoluminescence bilayer: SiOx/a-SiC:H - A1/B1 and A2/B1 red, yellow, green and blue emission.[2,3]

Conclusion

We obtained SiOx/a-SiC: H bilayers using LPCVD and PECVD techniques. SiOx monolayers showed absorbance peaks and PL characteristics in the visible red region. Also, the a-SiC: H monolayer showed SiC and SiCH absorbance peaks and PL in the blue to the yellow visible region. Our SiOx/a-SiC: H bilayers showed a PL emission as a result of optical properties combination of the single layers with a PL emission of all primary colors as a first approximation to develop a white electroluminescence device.

Reference

- [1] Kirk, C. T. (1988). Quantitative analysis of the effect of disorder-induced mode coupling on infrared absorption in silica. *Physical Review B*, 38(2), 1255.
- [2] Bullet, J., & Schmitt, M. P. (1967). Physics of amorphous-silicon carbon alloys [J]. *Phys Status Solidi B*, 1(3), 345-348.
- [3] Vivaldo, I., Moreno, M., Torres, A., Ambrosio, R., Rosales, F., Carlos, N., ... & Benítez, A. (2017). A comparative study of amorphous silicon carbide and silicon rich oxide for light emission applications. *Journal of Luminescence*, 190, 215-220.



# ¿Qué le pasa al SARS-CoV-2 en contacto con diferentes superficies?

Gerardo Gustavo Ramírez Ruiz, Estrella Ramos, Héctor Domínguez, Rodolfo Gómez Balderas

Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, CDMX, México

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. A Teoloyucan Km 2.5, San Sebastian Xhala, 54714 Cuautitlán Izcalli, Méx.

[hectordc@unam.mx](mailto:hectordc@unam.mx), [gustavo95@ciencias.unam.mx](mailto:gustavo95@ciencias.unam.mx)

## SARS-CoV-2|RBD| ACE-2|Dinámica Molecular

El nuevo coronavirus, responsable del síndrome respiratorio agudo grave (SARS-CoV-2), emergió como un patógeno humano en diciembre del 2019 en Wuhan, en la provincia de Hubei, en China [1, 2]. Es el tercer coronavirus que logra atravesar la barrera entre especies en tan solo dos décadas.

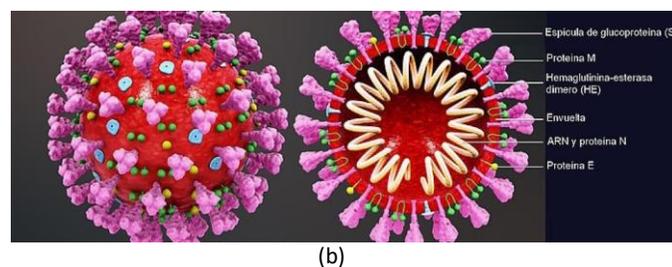
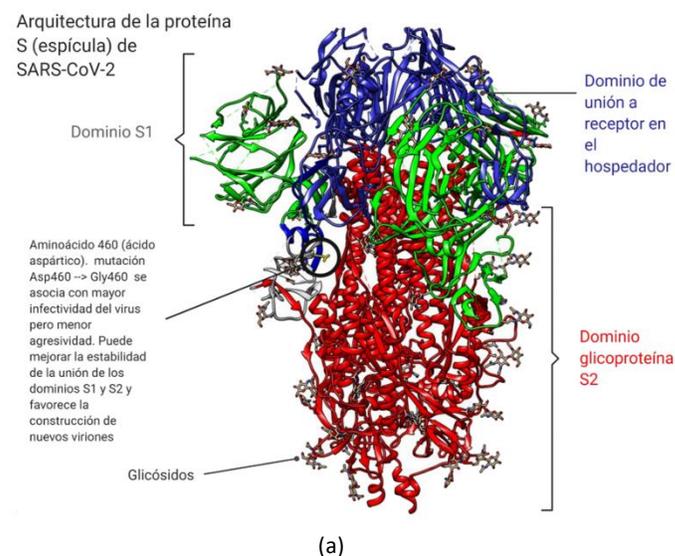
El SARS-CoV-2 es un  $\beta$ -coronavirus, perteneciente a la familia *Coronaviridae*. Tiene un ARN genómico monocatenario de sentido positivo y está recubierto por una bicapa lipídica que, en conjunto con las proteínas estructurales, conforma el armazón del virus [3].

El SARS-Cov-2 está compuesto por cuatro proteínas estructurales conocidas como: nucleocápside (N), envoltura (E), membrana (M) y glicoproteína espicular (S)[4] (ver figura 1). En particular, la proteína S que se proyecta en forma

de espículas juega un papel fundamental en la infección de células susceptibles al SARS-CoV-2, que contienen la enzima convertidora de angiotensina (ACE-2).

*El ACE-2 es el receptor humano, objetivo del RBD en el complejo de la proteína S del SARS-CoV-2*

Esta proteína, comprende la subunidad S1, donde se encuentra el RBD (responsable del enlace con el receptor humano ACE-2) y otra subunidad, S2, que permite el vínculo del virus con la membrana celular después de que las subunidades S1 y S2 se han anclado.



**Figura 1.** (a) Estructura de la glicoproteína espicular del SARS-CoV-2. (b) Corte transversal de un coronavirus indicando las proteínas estructurales del SARS-CoV-2[6].

Comprender las interacciones entre el SARS-CoV-2 y las superficies a nivel fisicoquímico puede ayudarnos en el diseño de futuros experimentos que involucren virus en superficies, para identificar materiales que actúen como barreras de protección y que tengan la capacidad de desactivar al virus.

*El RBD es el dominio de unión  
en la proteína S responsable del  
enlace con el receptor ACE-2*

*Las superficies de oro, cobre y grafito son  
capaces de inhibir diferentes tipos de virus*

Teniendo en consideración que el protómero RBD aislado representa una pequeña sección de la glicoproteína S, este fragmento puede representar un modelo útil y menos costoso para modelar la interacción del SARS-CoV-2 con diferentes superficies. Resulta muy interesante explorar el fenómeno de adsorción del virus tomando como modelo el RBD sobre diferentes superficies.

De manera general, el presente trabajo se enfoca en los cambios en la adsorción del protómero RBD en diferentes superficies y el efecto desactivante de las mismas. Se estudió la adsorción por medio de dinámica molecular en una superficie de cobre, sobre una superficie de oro y sobre una superficie de grafito.

En el estudio de la interacción del RBD con las diferentes superficies también se analizó el comportamiento del RBD aislado con la finalidad de tener un punto de referencia en la apreciación de los efectos inducidos en el RBD como consecuencia de la adsorción. La robusta caracterización de la interacción fue meramente cualitativa y se incluyeron todos aquellos parámetros que, de acuerdo a la literatura, se utilizan más frecuentemente en estudios relacionados.

*La caracterización global del RBD mostró  
cambios estructurales inducidos por la  
adsorción sobre las superficies*

De acuerdo con los resultados de la caracterización global de la estructura del RBD, su estructura mostró cambios estructurales inducidos por la adsorción sobre las superficies.

La cadena principal del RBD sufrió los cambios estructurales más grandes durante la adsorción sobre la superficie de oro, donde la estabilidad en la estructura del RBD se vio más afectada. Como consecuencia es la adsorción más favorecida y el RBD tuvo el desplegamiento más notable, en comparación con las otras dos superficies. Por otro lado, la adsorción sobre la superficie de grafito presentó la adsorción menos favorecida.

Durante esta interacción, la cadena principal del RBD se vio afectada en menor medida y la estructura del RBD mostró la conformación con mayor plegamiento, que, en términos de estabilidad estructural significó la interacción donde la estructura del RBD se mantuvo más compacta o estable entre los tres procesos de adsorción estudiados. Mientras que la adsorción sobre la superficie de cobre quedó en un caso intermedio.

Un análisis más detallado (línea temporal de la estructura secundaria) mostró los cambios inducidos en la estructura secundaria por efecto de la adsorción sobre las superficies y aquellos cambios como consecuencia de la relajación del RBD en el disolvente.

*A las regiones que presentan regiones con  
puentes de hidrógeno regulares en una  
proteína se les conoce como estructuras  
secundarias. La línea temporal es una  
herramienta que permite rastrear la evolución  
de las estructuras secundarias en el RBD.  
Al plegamiento de las estructuras secundarias  
que conforman una proteína se le conoce  
como estructura terciaria.*

La estabilidad estructural del RBD también se vio afectada por las interacciones con las moléculas de agua presentes en el disolvente.

Otra forma de verlo es a partir de la formación de puentes intermoleculares de hidrógeno, que contribuyen a definir la estructura terciaria del RBD, así como la formación de puentes de hidrógeno entre el RBD y las moléculas de agua del disolvente.

La adsorción sobre las superficies metálicas mostró un menor conteo en el número de puentes de hidrógeno intermoleculares del RBD en comparación con el presentado durante la adsorción sobre la superficie de grafito. Mientras que la adsorción sobre las superficies metálicas mostró un mayor conteo en el número de puentes de hidrógeno entre el RBD y las moléculas de agua, en comparación con lo registrado sobre la superficie de grafito.

Con esto se justifica la pérdida de la estabilidad estructural del RBD observada sobre las superficies metálicas y la conformación compacta del RBD sobre la superficie de grafito.

De forma consistente, el desplegamiento en la estructura del RBD se vio favorecido al haber más sitios disponibles para formar puentes de hidrógeno con las moléculas de agua y menos favorecido al haber menos sitios disponibles en la estructura del RBD.

Hasta ahora solo hemos descrito a grandes rasgos los efectos globales producidos sobre la estructura del RBD. Sin embargo, la naturaleza polar de las superficies también jugó un papel determinante en los procesos de adsorción.

*Hidrofóbico: tendencia a evitar interacciones con moléculas de agua*

*Hidrofílico: tendencia a interactuar con moléculas de agua*

En este sentido, la superficie de grafito representó la superficie con mayor naturaleza hidrofóbica, donde la primera capa de hidratación mostró la menor densidad de moléculas de agua. Mientras que la superficie de cobre representó la superficie con la menor naturaleza hidrofóbica, al mostrar la primera capa de hidratación con la mayor densidad de moléculas de agua.

De igual forma, se observó un ordenamiento de los residuos del RBD ubicados en el intervalo que comprendía la primera y segunda capa de hidratación, respectivamente.

*Se llama residuo a cada uno de los aminoácidos que forman un péptido*

Al monitorear el proceso de adsorción del RBD fue posible identificar la superficie más afín, así como los residuos de aminoácidos involucrados.

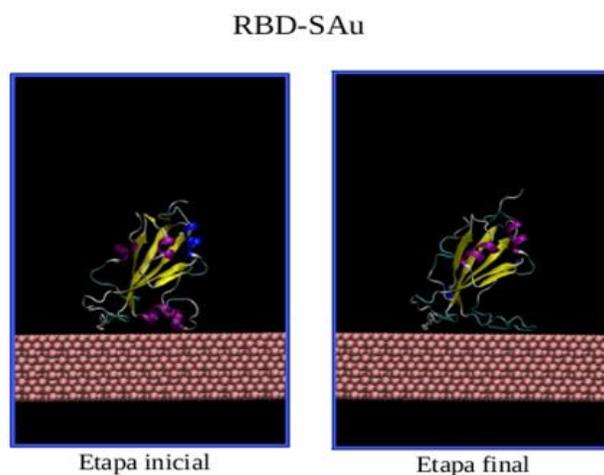
*La adsorción de proteínas en superficies sólidas es irreversible y por lo tanto conduce a la inmovilización de proteínas en la fase de la superficie dado que ya no son libres de difundirse [8]*

Esto es de suma trascendencia, dado que un cambio estructural podría conllevar a la pérdida de actividad biológica del RBD para el vínculo con el receptor humano ACE-2. En virtud de nuestros resultados, la interacción sobre la superficie de oro (ver figura 2) fue la que representó la adsorción más favorable para el RBD, donde dominaron

residuos de carácter polar (Arg, Gln, Ser). De acuerdo con las referencias, se ha observado que este tipo de residuos favorecen la adsorción sobre una superficie de oro.

Sobre la superficie de cobre (ver figura 3), el proceso inicial de adsorción registró un menor número de residuos respecto al de las otras dos superficies. Algunas referencias indican que diferentes superficies no se adsorben fácilmente sobre el cobre, mientras que en una etapa más avanzada de la adsorción predominaron residuos de carácter hidrofóbico. De acuerdo con trabajos experimentales y de cálculos a nivel DFT, la Arg fue uno de los residuos más presentes (adsorbido fuertemente sobre esta superficie). Asimismo, Lys y Gly mostraron una escasa y débil participación en el proceso de adsorción; comportamiento observado en estudios anteriores de adsorción sobre el cobre.

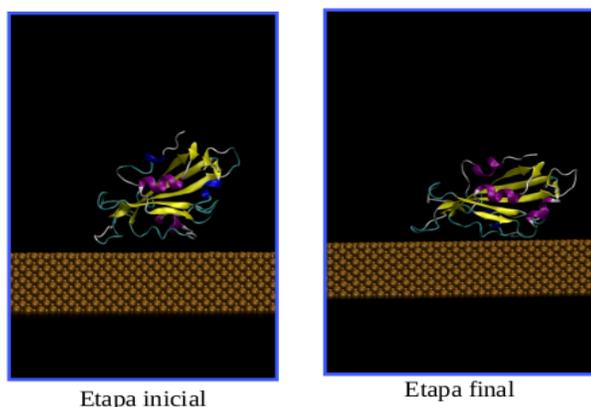
Sobre la superficie de grafito (ver figura 4) encontramos el tercero y menos favorecido caso de adsorción. La explicación de este comportamiento está asociada a la dominante presencia de residuos hidrofílicos (Arg, Gln) y de carácter anfipático (Thr, Tyr, Lys), que en este caso impidieron que la adsorción fuera favorecida aun con la presencia de residuos hidrofóbicos (Ile y Pro).



**Figura 2.** RBD en la etapa inicial y final de adsorción sobre la superficie de oro.

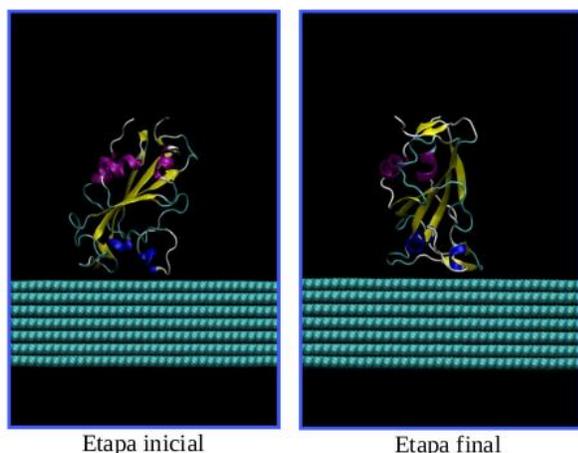
Nuevamente, un comportamiento observado en estudios anteriores que resaltan la importancia de los efectos cooperativos para llevar aminoácidos polares hacia la superficie de grafito, como ocurriría con aquellos hidrofóbicos, que se sabe que tienen una interacción más fuerte sobre esta superficie.

RBD-SCu



**Figura 3.** RBD en la etapa inicial y final de adsorción sobre la superficie de cobre.

RBD-SC

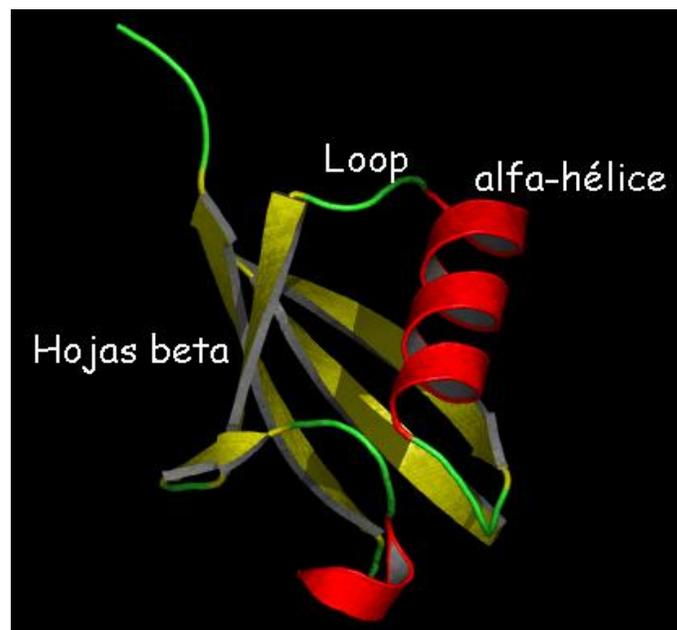


**Figura 4.** RBD en la etapa inicial y final de adsorción sobre la superficie de grafito.

*La adsorción sobre las superficies metálicas causó más cambios en el RBD en comparación con la adsorción sobre el grafito*

En su mayoría, los residuos involucrados en la adsorción sobre las tres superficies estuvieron asociados a estructuras secundarias de tipo lazos y vueltas, con excepción de algunos sobre estructuras secundarias de tipo  $\alpha$ -hélices (estructura helicoidal con 3.6 residuos por vuelta),  $3_{10}$ -hélices (estructura helicoidal con 3 residuos por vuelta) y hojas- $\beta$ . (ver figura 5).

Estas últimas tienen posiciones más restringidas en sus átomos, en comparación con los lazos y vueltas, que no tienen restricciones en sus posiciones atómicas y que son de las partes más flexibles que tienen generalmente las proteínas. Mientras que los lazos y vueltas son comúnmente encontradas sobre la superficie de proteínas y típicamente sobresalen en el disolvente.



**Figura 5.** Estructuras secundarias más comunes en una proteína.

Los lazos y vueltas proporcionan sitios convenientes para el reconocimiento molecular y unión de ligandos, un hecho que pudimos corroborar al darnos cuenta de que, en su mayoría, los residuos relevantes en el vínculo del RBD con el ACE-2 estuvieron asociados a este tipo de estructuras secundarias.

*La pérdida en la flexibilidad del RBD fue más notable en el RBD adsorbido, respecto al RBD aislado*

Finalmente, un análisis de la flexibilidad de los residuos del RBD permitió identificar las regiones más flexibles durante la etapa inicial y avanzada de adsorción. De acuerdo con nuestros resultados, en su mayoría, las regiones más flexibles estuvieron asociadas a estructuras secundarias de tipo lazos y vueltas. Asimismo, se observó que durante una etapa inicial de la adsorción del RBD sobre la superficie de oro, el RBD mostró regiones con mayor flexibilidad. Mientras que, en una etapa avanzada de la adsorción, la pérdida en la flexibilidad del RBD

fue más notable en el RBD adsorbido, respecto al RBD aislado. Estos resultados proveen evidencia de que la interacción del RBD sobre estas superficies irrumpe en la organización atómica espacial de la cadena principal y de las cadenas laterales del RBD, así como en su capacidad para adaptarse a su entorno. Algo que, en consecuencia, sí podría llevar a la inhibición de su función biológica principal.

Aún queda mucho trabajo por hacer, se espera que estos resultados puedan servir como punto de partida para investigaciones futuras que busquen profundizar en la misma dirección de estudio. A manera de propuesta, se incluyen algunas perspectivas a futuro: utilización de otro campo de fuerzas y comparar con los resultados obtenidos, utilizar dinámica molecular fuera de equilibrio para estudiar la desorción del RBD sobre las superficies, utilizar métodos híbridos de mecánica molecular y mecánica cuántica (QM/MM) en el estudio de las regiones específicas y relevantes en el vínculo RBD-ACE-2, realizar una caracterización cuantitativa de cada proceso de adsorción, por mencionar algunos.

Cada una con un enfoque distinto, pero todas ellas con un objetivo en común, el avance en el entendimiento del SARS-CoV-2 y sus interacciones para el beneficio humano.

## Referencias

- [1] N. Zhu, D. Zhang, W. Wang, L. Xingwang, Y. Bo, S. Jingdong, Z. Xiang, H. Baoying, S. Weifeng, L. Roujian, N. Peihua, Z. Faxian, M. Xuejun, W. Dayan, X. Wenbo, W. Guizhen, G. G. F. and T. Wenjie, "A Novel Coronavirus from Patients with Pneumonia in China, 2019", *New England Journal of Medicine*, vol. 382, Feb. 2020.
- [2] Z. Benková, M.N.D.S. Cordeiro, "Structural behavior of monomer of SARS-CoV-2 spike protein during initial stage of adsorption on graphene", *Elsevier*, vol. 22, Aug. 2021.
- [3] J. Lan, J. Ge, J. Yu, S. Shan, H. Zhou, S. Fan, Q. Zhang, X. Shi, Q. Wang, L. Zhang, and X. Wang, "Structure of the SARS-CoV-2 spike-receptor-binding domain bound to the ACE2 receptor", *Nature*, vol. 581, Mar. 2020.
- [4] Comisión Directiva Sociedad Argentina de Virología, "INFORME SARS COV-2", *aam*, vol. 1, Mar. 2020.
- [5] D. C. Malaspina and J. Faraudo, "Computer simulations of the interaction between SARS-CoV-2 spike glycoprotein and different surfaces", *Biointerphases*, vol. 15, Oct. 2020.
- [6] Universidad de Alcalá, "Introducción a la biología molecular del coronavirus SARS-CoV-2", link: <http://www3.uah.es/quimicaevol/index.php/introduccion-a-la-biologia-molecular-del-coronavirus-sars-cov-2/>.
- [7] G. Hamid, Y. Hessam, H. F. Elham, and M. Yaghoub, "Interactions of SARS-CoV-2 with inanimate surfaces in built and transportation environments", *Sustainable Cities and Society*, vol. 72, Sept. 2021.
- [8] G. A. Petsko and D. Ringe, "Protein Structure and Function", Oxford University Press, 2004.

**Liga de acceso a las animaciones de la simulación:**

[https://drive.google.com/drive/folders/1rKEHlqjFEYur\\_mRn-RoGUu5pb3GxiqJZ?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1rKEHlqjFEYur_mRn-RoGUu5pb3GxiqJZ?usp=sharing)

# Citotoxicidad de híbridos de óxido de hierro con goma arábica

Dulce Guzmán<sup>1</sup>, Mario Eduardo Cano<sup>2</sup>,  
Jesús Bernal<sup>1</sup>, Teodoro Córdova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato campus León. Lomas del Bosque # 103, Col. Lomas del Campestre, C.P. 37150, León, Gto, México

<sup>2</sup>Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara. Av. Universidad #1115, col. Linda Vista, C.P. 47810, Ocotlán, Jalisco, México

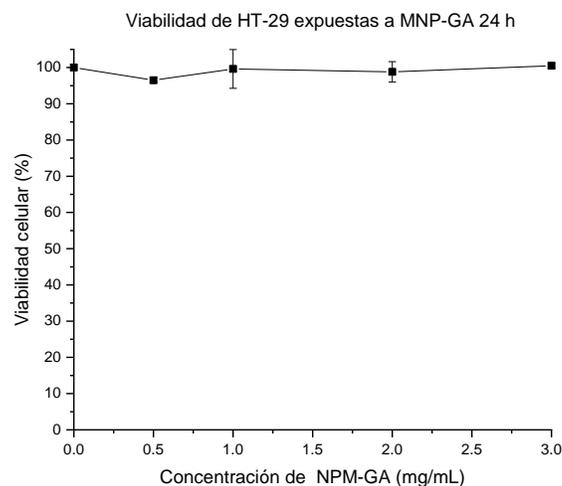
[dulguzman30@gmail.com](mailto:dulguzman30@gmail.com)

## Resumen

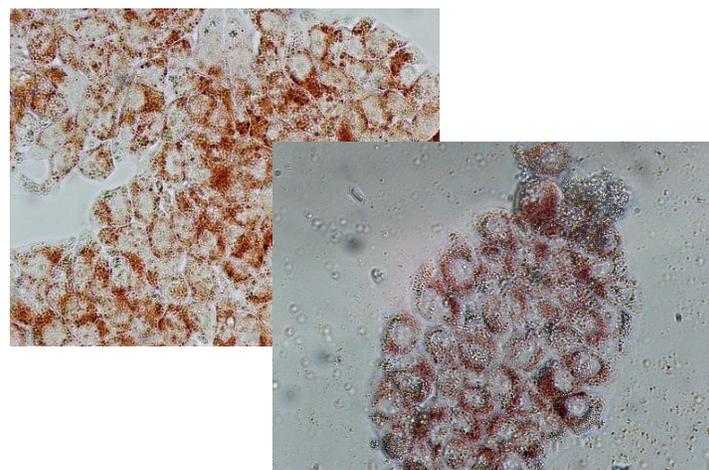
En las últimas seis décadas, el estudio de las nanopartículas magnéticas ha tenido un gran auge. Gracias a sus propiedades de superparamagnetismo pueden ser utilizadas para diversas aplicaciones, una de ellas, el área biomédica. De especial interés es la hipertermia magnética [1]. La citotoxicidad es el efecto que tendrán las nanopartículas en la célula. Aquí radica la importancia de evaluar los nuevos materiales *in vitro* antes de su uso en la clínica.

En este trabajo se estudió el efecto citotóxico del híbrido de óxido de hierro con goma arábica MNP-GA sobre la línea celular de cáncer de colon HT-29, utilizando concentraciones que van de 0,5 a 3 mg/ml del ferrofluido del híbrido. Para determinar la actividad metabólica, se realizaron análisis cuantitativos (WST-1) y cualitativos (captación de rojo neutro).

Los resultados obtenidos confirmaron que las nanopartículas hibridadas no son tóxicas, ya que a todas las concentraciones las células HT-29 se tiñeron de rojo y presentaron una forma regular y homogénea, lisosomas y membranas funcionales [2].



**Figura 1.** Viabilidad de la línea celular HT-29 expuestas a MNP-GA



**Figura 2.** Captación de rojo neutro en células HT-29 después de 24 horas de exposición a MNP-GA. Arriba, células control. Abajo, células expuestas con MNP-GA. En todas las concentraciones, las células HT-29 se tiñeron de rojo, tenían forma regular y homogénea, y también lisosomas y membranas funcionales.

## Resumen

- Cruz MM, Ferreira LP, Alves AF, Mendo SG, Ferreira P, Godinho M, Carvalho MD (2017), "Nanoparticles for magnetic hyperthermia". *Nanostructures Cancer Ther.* 105:485-511. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46144-3.00019-2>
- Guzmán-Rocha, D.A.; Córdova-Fraga, T.; Bernal-Alvarado, J.J.; López, Z.; Cholico, F.A.; Quintero, L.H.; Paz, J.A.; Cano, M.E. A ferrofluid with High Specific Absorption Rate Prepared in a Single Step Using a Biopolymer. *Materials* 2022, 15, 788. <https://doi.org/10.3390/ma15030788>

# Perovskitas dobles y libres de plomo: diseñando los materiales fotovoltaicos del mañana

Jean Luis Castillo Sánchez<sup>1</sup>,  
Arnulfo Montoya-Moreno<sup>1</sup>,  
Álvaro de Jesús Ochoa Calle<sup>2</sup>, Óscar Olvera-Neria<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco  
Área de Física Atómica Molecular y Aplicada (FAMA), CBI,  
Av. San Pablo Xalpa 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Alcaldía  
Azcapotzalco, C.P. 02200, CDMX

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa  
Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma  
1A Sección, Alcaldía Iztapalapa, C.P. 09310, CDMX

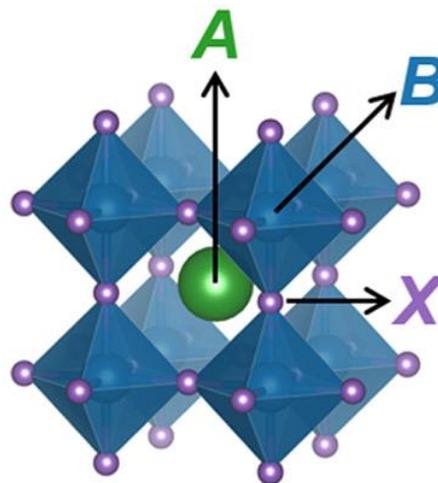
[jlcs\\_17@live.com](mailto:jlcs_17@live.com)

## Resumen

Se reportan por primera vez las perovskitas  $K_2AgSbI_6$ ,  $Rb_2AuBiBr_6$  y  $K_2AgBiI_6$ , con brecha de energía indirecta a través del diseño teórico de perovskitas dobles semiconductoras y libres de plomo, mediante cálculos de estructura electrónica usando la teoría del funcional de la densidad (DFT). El criterio de selección consistió en el cumplimiento simultáneo del factor de tolerancia de Goldschmidt ( $t$ ), el factor octaédrico ( $\mu$ ) y el factor de la celda ( $\rho$ ) con base en los radios iónicos de Shannon de los elementos presentes en los candidatos a perovskitas dobles. El análisis generó un conjunto de 564 cristales de perovskitas dobles, donde  $K_2AgSbI_6$  (brecha de energía 0.69 eV),  $Rb_2AuBiBr_6$  (0.86 eV),  $K_2AgBiI_6$  (1.33 eV),  $Rb_2AgBiI_6$  (1.37 eV) y  $Rb_2AuSbI_6$  (2.01 eV) exhibieron la mayor actividad en el espectro visible y una naturaleza semiconductoras tras el cálculo de su brecha al nivel HSE06/POB-TZVP-rev2.

## Introducción

Las perovskitas son minerales de titanato de calcio ( $CaTiO_3$ ) con estructura ortorrómbica y fueron descubiertas en 1839 por el científico alemán Gustav Rose en los Montes Urales, quien las nombró en honor al conde y mineralogista ruso Lev Aleksevich von Perovski [1]. En la actualidad, el término perovskita se utiliza para denominar a una gran variedad de materiales sintéticos que comparten la misma estructura cristalina que el  $CaTiO_3$ , o bien, una estequiometría equivalente del tipo  $ABX_3$ , donde A corresponde a un catión inorgánico u orgánico monovalente, B a un catión metálico divalente y X a un ion haluro (figura 1) [2,3].



**Figura 1.** Modelo cristalográfico del sistema  $ABX_3$  con estructura cúbica simple ideal ( $Pm\bar{3}m$ ). El catión  $A^+$  se encuentra rodeado por una red de ocho octaedros  $BX_6$  [3]. Science Advances (Bartel, 2019).

Debido a la diversidad de sus propiedades, las perovskitas híbridas de haluro metálico ( $ABX_3$ ) pueden tener aplicaciones en disciplinas como la electrocatálisis [4], la ingeniería de baterías [5] y en el transporte de protones en celdas de combustible [6], así como en el campo de los materiales ferroeléctricos [7], optoelectrónicos [8] y fotovoltaicos [3,9]. Siendo este último el de mayor auge en los últimos años debido a la creciente demanda energética mundial y la subsecuente necesidad de aprovechar el recurso más abundante que existe en la Tierra: la radiación solar [10].

La implementación de perovskitas en las celdas solares incrementó sustancialmente la eficiencia en la conversión de energía (ECE) y redujo los costos de producción del sector en muy poco tiempo [11]. En concreto, a partir del año 2009, la ECE pasó de un 3.8 % con la implementación primigenia de nanocristales de la perovskita  $CH_3NH_3PbI_3$  [12] a un 25.7 %

para las celdas solares de perovskita (CSP) de unión simple de última generación, cifra comparable con el 26.1 % conseguido por las celdas de silicio monocristalino y con el 29.8 % alcanzado por las celdas de perovskita-silicio con arquitectura tándem (figura 2) [13].

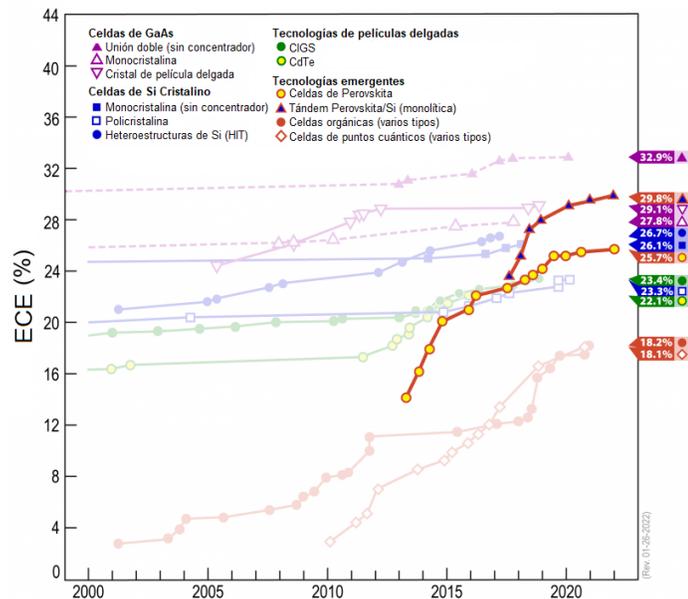


Figura 2. Registro de la eficiencia en la conversión de energía (ECE) de las celdas solares de perovskita comparada con diferentes tecnologías [11,13]. Photovoltaic Research, NREL (2022).

No obstante, a pesar del progreso conseguido por las CSP en la última década, aún deben superarse algunos obstáculos que limitan su viabilidad comercial. Por ejemplo, el tiempo de vida útil, la estabilidad a la intemperie, la toxicidad debida a la incorporación de metales pesados como el Pb y la ECE a gran escala [11,14–17].

### MAPI

La perovskita  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  o MAPI (donde MA corresponde al catión orgánico metilamonio,  $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$ , situado al interior de la celda unitaria) (figura 3), es conocida por su toxicidad debida a la presencia del Pb y por su baja estabilidad a causa de la interacción del catión altamente volátil MA con la humedad, el calor y la luz (incluida la radiación UV) [18–20]. Sin embargo, también es cierto que exhibe propiedades muy atractivas para el campo de las aplicaciones fotovoltaicas, tales como una brecha de energía prohibida ( $E_{\text{gap}}$ ) de 1.55 eV, un alto coeficiente de absorción de  $10^4$ – $10^5 \text{ cm}^{-1}$ , una energía de enlace del excitón de 10–30 meV y una ECE del 25.2 % [18]; características que continúan atrayendo la atención de la

comunidad científica [14, 17, 21] y la han convertido en un arquetipo para el desarrollo de nuevos materiales.

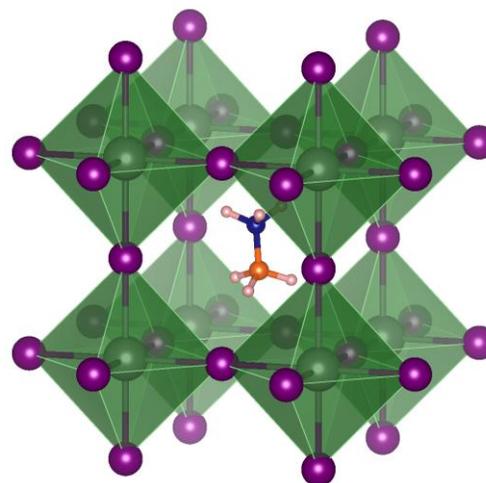


Figura 3. Celda unitaria de la perovskita  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  o MAPI con estructura cúbica simple ideal (Pm3m). El catión orgánico  $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$  se sitúa en el centroide de la celda, mientras que los cationes inorgánicos  $\text{Pb}^{2+}$  se encuentran embebidos en los octaedros conformados por los iones de haluro  $\text{I}^-$ .

### Criterios de estabilidad

Desde un punto de vista cristalográfico, la formación de una perovskita y su estabilidad dependen de los siguientes criterios: la neutralidad de la carga entre los cationes y los aniones que la conforman [22]; el factor de tolerancia de Goldschmidt ( $t$ ), que es un indicador de las fases que favorecen la formación de la estructura, obtenido a partir del radio iónico ( $r_{\text{ion}}$ ) de las especies presentes mediante la expresión [23]:

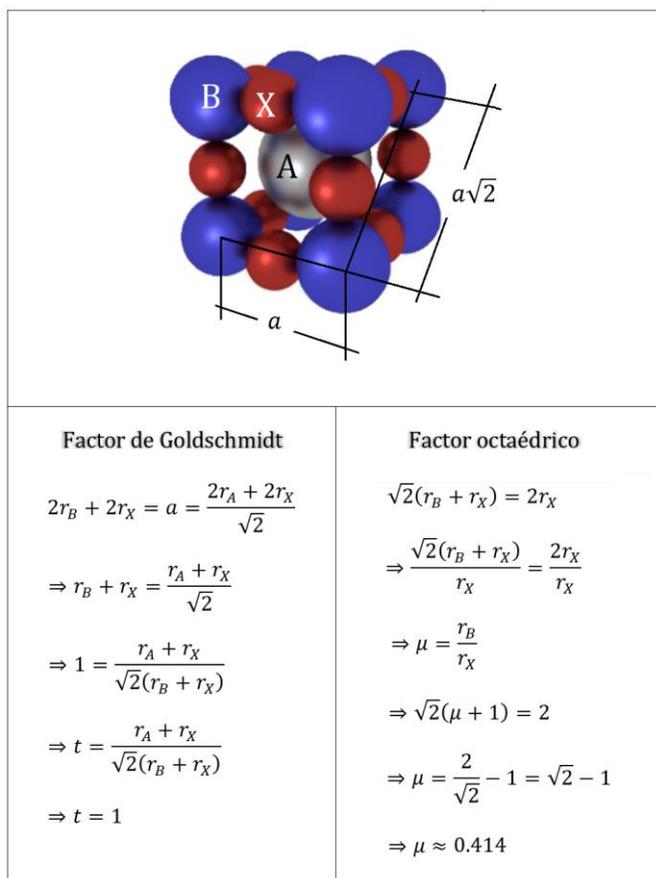
$$t = \frac{(r_A + r_X)}{\sqrt{2}(r_B + r_X)} \tag{1}$$

y la estabilidad del octaedro  $\text{BX}_6$ , dada por el factor octaédrico ( $\mu$ ) de la forma [23–25]:

$$\mu = \frac{r_B}{r_X} \tag{2}$$

Se ha reportado que la tolerancia empírica del factor de Goldschmidt y la estabilidad del factor octaédrico para la formación de perovskitas comprenden los intervalos 0.8–1.0 [24,25] y 0.414–0.732 [26], respectivamente. No obstante, algunos análisis estadísticos indican que las estructuras prevalecen en el régimen  $0.81 < t < 1.11$  [26–30] y que la estabilidad del octaedro se mantiene en el régimen  $0.44 < \mu < 0.90$  [26–29]. Por ejemplo, cuando  $t > 1.0$ , el tamaño del catión  $\text{A}^+$  excede las dimensiones para

conformar una perovskita ideal, en cuyo caso la estructura adquiere una disposición hexagonal [24, 25, 31, 32]. Por otra parte, si  $0.9 < t < 1.0$ , la formación de perovskitas con estructura cúbica es predominante [33]. Ahora bien, cuando  $0.8 < t < 0.9$ , las perovskitas adquieren una disposición ortorrómbica, romboédrica o tetragonal, mientras que para  $t < 0.8$ , el tamaño del catión A es muy pequeño como para que la red pueda formarse [33].



**Figura 4.** Factor de Goldschmidt y factor octaédrico derivados de la geometría de una porción de la celda unitaria de una perovskita doble con estructura cúbica centrada en las caras (Fm3m) (adaptación) [23] [PNAS \(Filip, 2018\)](#).

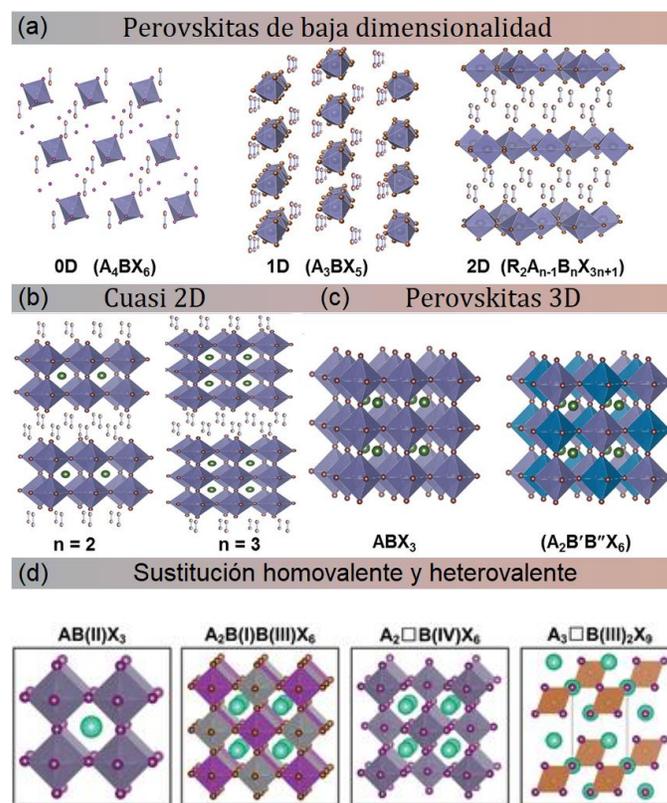
### Diseño de perovskitas estables y libres de plomo

Una de las estrategias para disminuir la toxicidad de la perovskita MAPbI<sub>3</sub> consiste en la sustitución homovalente del ion Pb<sup>2+</sup> por un catión metálico de configuración electrónica similar [25, 34, 35] (figura 5d). Asimismo, se ha propuesto el intercambio del ion MA<sup>+</sup> por un catión orgánico o inorgánico

monovalente de menor volatilidad, o una mezcla de ambos, con el fin de incrementar la estabilidad de la estructura [18]. Los esfuerzos en esta dirección no han sido suficientes y la carrera por encontrar nuevos materiales que imiten o mejoren las propiedades optoelectrónicas de las perovskitas de haluro de plomo sigue vigente [3,18], siendo la sustitución heterovalente del ion Pb<sup>2+</sup> la alternativa con mayor proyección en este campo [25, 35–50].

### Sustitución heterovalente

La sustitución heterovalente abre un abanico de posibilidades para la formación de perovskitas en 3D, 2D, 1D y 0D [35, 38, 51] (figura 5a–c).

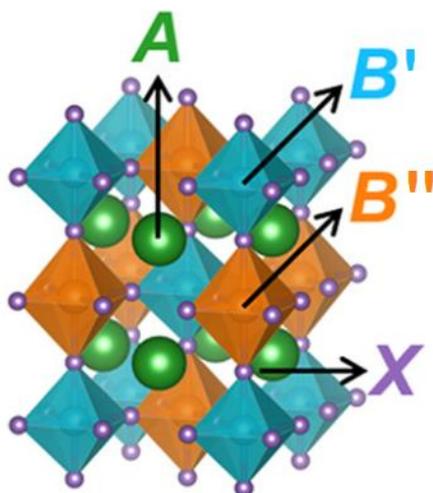


**Figura 5.** Representación de perovskitas con estructuras (a) 0D, 1D, 2D, (b) cuasi 2D y (c) 3D (adaptación). Las perovskitas bidimensionales con número de capas (n) corresponden a planos cristalográficos de la estructura ABX<sub>3</sub>, pero se encuentran separados por recubrimientos delgados de un catión orgánico (R) [38]. [Advanced Science \(Kakavelakis, 2020\)](#). (d) Ejemplos de sustitución homovalente y heterovalente del catión Pb<sup>2+</sup> en la perovskita de haluro de plomo APbX<sub>3</sub> (adaptación) [37] [Advanced Materials \(Xiao, 2019\)](#).

Por ejemplo, el intercambio del ion Pb<sup>2+</sup> por un catión metálico tetravalente como Sn<sup>4+</sup> o Pd<sup>4+</sup>, produce perovskitas

tridimensionales de vacancia ordenada con estequiometría  $A_2\Box B(IV)X_6$ , donde “ $\Box$ ” representa la ausencia de un catión metálico en la estructura para mantener la neutralidad de la carga (figura 5d) [25, 36, 51]. Mientras que la sustitución de tres iones  $Pb^{2+}$  por dos cationes metálicos trivalentes como  $Bi^{3+}$  o  $Sb^{3+}$  conduce a la formación de compuestos bidimensionales de vacancia ordenada con estequiometría triple  $A_3\Box B(III)_2X_9$  (figura 5d) [37, 51]. No obstante, la familia de las perovskitas dobles con estequiometría  $A_2B(I)B(III)X_6$ , comúnmente denominada  $A_2B'B''X_6$ , se ha posicionado como la más diversa y prometedora de todas (figura 5d) [35].

### Perovskitas dobles $A_2B'B''X_6$



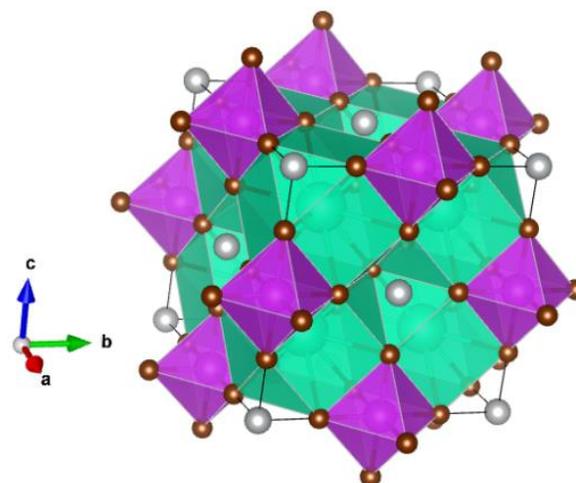
**Figura 6.** Porción de la celda unitaria del sistema  $A_2B'B''X_6$  con estructura cúbica centrada en las caras (Fm-3m) (adaptación) [3]. *Science Advances* (Bartel, 2019).

Las perovskitas dobles,  $A_2B'B''X_6$ , mantienen una estructura similar a la de las perovskitas del tipo  $ABX_3$ , pero admiten la incorporación de una mayor variedad de cationes metálicos en los sitios de coordinación octaédrica vía la sustitución heterovalente del catión  $B^{2+}$  [35]. De este modo, las posiciones del catión metálico divalente ( $B^{2+}$ ) son ahora ocupadas por un catión metálico monovalente ( $B'$ ) y un catión metálico trivalente ( $B''$ ) situados alternadamente para conformar una estructura tipo elpasolita [3, 25, 35, 51, 52] (figura 6). Asimismo, tal como sucede con las perovskitas del tipo  $ABX_3$ , la neutralidad de carga y los intervalos de tolerancia de los factores  $t$  y  $\mu$  son indicadores de la estabilidad y la probabilidad de formación de una perovskita doble. De esta manera, al considerar los radios iónicos de  $B'$  y  $B''$ , el factor

de tolerancia de Goldschmidt adopta la forma  $t = (r_A + r_X) / \sqrt{2}[(r_{B'} + r_{B''})/2 + r_X]$  (3), mientras que la estabilidad del factor octaédrico queda descrita por la expresión  $\mu = (r_{B'} + r_{B''})/2r_X$  (4) [28].

### $Cs_2AgBiBr_6$

De la variedad de perovskitas dobles sintetizadas a partir del año 2016, p. ej.,  $Cs_2AgBiBr_6$ ,  $Cs_2AgBiCl_6$  [53–55],  $Cs_2AgSbCl_6$  [56–58],  $(MA)_2AgBiBr_6$  [59] y  $(MA)_2KBiCl_6$  [60], la perovskita  $Cs_2AgBiBr_6$  (figura 7) se destaca por exhibir propiedades optoelectrónicas similares a las de su contraparte de haluro de plomo [61]. Por ejemplo, los portadores de carga tienen un tiempo de vida de  $\sim 660$  ns [53], cifra cercana a los  $\sim 736$  ns de  $MAPbI_3$  [62], un coeficiente de absorción de  $\sim 4 \times 10^4$   $cm^{-1}$  [61] y una masa efectiva  $m_e^* \sim 0.34 m_e$  [55, 63–65].



**Figura 7.** Celda unitaria de la perovskita  $Cs_2AgBiBr_6$  con estructura cúbica centrada en las caras (Fm-3m).

Además, presenta una brecha de energía indirecta de 1.95–2.3 eV [53–55, 66], que resulta apropiada para su acoplamiento con Si en configuración tándem [53], así como una menor toxicidad [61] y una mayor estabilidad ante la humedad y la temperatura [37, 54, 67].

En los últimos seis años se han sintetizado cristales [53, 68–70], nanocristales [71, 72] y películas delgadas [67, 73–77] de la perovskita  $Cs_2AgBiBr_6$ , con miras a su implementación en celdas solares [37, 78]. Además, se publicaron diversos artículos que emplearon la teoría del funcional de la densidad (DFT, por sus siglas en inglés) para el estudio de sus propiedades termodinámicas [79–82], brecha de energía [64, 80, 81, 83–85], estructura de bandas [80, 85], densidad de

estados [64, 80], movilidad de los portadores de carga [80, 81], transferencia de carga a través de interfases [64], enlace químico [80] y funciones de respuesta óptica [80]. Desafortunadamente, a pesar de los esfuerzos en la caracterización del material y en la ingeniería de los dispositivos, las CSP basadas en  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$  apenas consiguieron una ECE del 3 % [61, 66, 78]. Sin embargo, si bien su ECE está limitada por la absorción de la luz visible [66], el límite de *Shockley-Queisser* establece que el máximo teórico de ECE para un material con una brecha de energía de 2.2 eV ronda el 18.42 % [86], lo que refrenda su potencial como material fotovoltaico y establece un punto de referencia para el diseño de nuevas perovskitas dobles.

## Metodología

Se llevó a cabo una búsqueda de candidatos a perovskitas dobles con estequiometría  $\text{A}_2\text{B(I)B(III)X}_6$  ( $\text{A} = \text{K}^+, \text{Rb}^+, \text{Cs}^+$  y  $\text{X} = \text{I}^-$  y  $\text{Br}^-$ ) a partir de un conjunto de metales monovalentes y trivalentes, exceptuando a los elementos Cr, As, Cd, Hg, Tl y Pb debido a su potencial citotoxicidad a bajas concentraciones [87, 88]. El criterio de selección consistió en el cumplimiento simultáneo del factor de tolerancia de Goldschmidt (ecuación 3) y el factor octaédrico (ecuación 4) dentro de los intervalos  $0.810 < t < 1.110$  y  $0.414 < \mu < 0.900$ , respectivamente. Asimismo, con base en los resultados previos del grupo de investigación, se propuso el factor de la celda o factor *cuboctaédrico*,  $\rho = r_A/r_X$ , que es un indicador de la estabilidad del sitio intersticial donde se encuentra embebido el catión  $\text{A}^+$  y está dado por la expresión  $\rho < (\mu - 0.488)/1.203$  (5) [89]. Para evaluar los criterios de estabilidad se implementó un algoritmo en MATLAB provisto de los radios iónicos de Shannon de los elementos que conformaron a cada estructura. El análisis arrojó un total de 564 candidatos de 2100 combinaciones posibles, cuya celda unitaria fue construida posteriormente a partir de la información cristalográfica de la perovskita  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$  publicada por Slavney *et al.* [53]. La optimización geométrica y el cálculo de las propiedades optoelectrónicas de los 564 candidatos y de la perovskita doble de referencia  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ , se efectuó a través de cálculos de estructura electrónica usando la teoría DFT y el funcional de intercambio y correlación de Perdew-Burke-Ernzerhof revisado para sólidos, PBEsol, mientras que los electrones internos (*core*) se representaron con el método de onda proyectada aumentada (PAW, por sus siglas en inglés) implementado en el código VASP-5.4.1. Se seleccionó una energía de corte de 500 eV y una malla de puntos  $k$  de  $6 \times 6 \times 6$  en la zona irreducible de *Brillouin*. Los criterios de convergencia

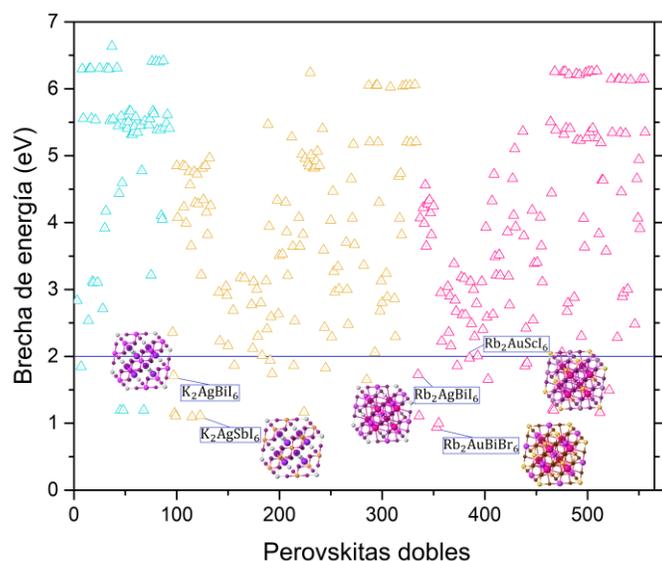
para la relajación de los grados de libertad electrónicos y la relajación iónica correspondieron a  $1.0 \times 10^{-6}$  eV y  $1.3 \times 10^{-3}$  eV/Å, respectivamente. La subestimación sistemática de las brechas de energía, característica del funcional PBEsol, fue corregida de manera preliminar utilizando la correlación lineal de la aproximación GW reportada por Morales-Valero-Illas,  $E_{gap}(G_0W_0) = 1.358 \cdot E_{gap}(PBE) + 0.904$  (6) [90].

El espectro de absorción UV-Vis de las perovskitas semiconductoras con una brecha de energía estimada  $< 2$  eV se calculó a partir del tensor dieléctrico dependiente de la frecuencia; relacionado con la absorción de la radiación electromagnética vía el coeficiente de extinción y cuya parte imaginaria se obtiene a partir de la densidad de estados electrónicos conjuntos y de los elementos de la matriz de momentos de los estados ocupados [91]. Por último, para mejorar la determinación de las brechas de energía, las perovskitas que exhibieron una mayor absorción en el espectro visible fueron optimizadas y caracterizadas electrónicamente empleando el funcional de intercambio y correlación híbrido de rango separado HSE06 mediante el programa CRYSTAL17 (v1.0.2) [92, 93] con la función de base POB-TZVP-rev2. En esta ocasión, se seleccionó una malla de puntos  $k$  de  $6 \times 6 \times 6$  en el espacio recíproco y los criterios de convergencia para la relajación de los grados de libertad electrónicos y la relajación iónica correspondieron a  $8.0 \times 10^{-7}$  eV y  $1.2 \times 10^{-3}$  eV/Å, respectivamente.

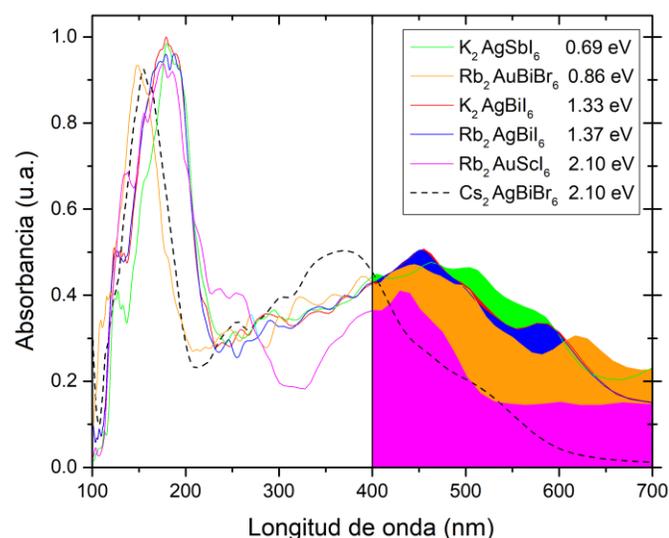
## Resultados y discusión

La caracterización electrónica de los candidatos mediante el funcional PBEsol dio como resultado 313 perovskitas dobles estables con carácter no-metálico, de las cuales solo 29 presentaron una brecha de energía por debajo de 2 eV de acuerdo con la correlación lineal de la aproximación GW (ecuación 6), ver figura 8.

Las perovskitas dobles  $\text{K}_2\text{AgSbI}_6$ ,  $\text{Rb}_2\text{AuBiBr}_6$ ,  $\text{K}_2\text{AgBiI}_6$ ,  $\text{Rb}_2\text{AgBiI}_6$  y  $\text{Rb}_2\text{AuSbI}_6$ , exhibieron una brecha de energía indirecta y una mayor actividad en el espectro visible en comparación con la perovskita de referencia  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ , ver figura 9.



**Figura 8.** Estimación de la brecha de energía de las 313 perovskitas dobles con carácter no-metálico a partir de la correlación lineal de la aproximación GW propuesta por Morales-Valero-Illas. Se resaltan las perovskitas con mayor actividad en el espectro visible. Los colores distinguen a tres familias en función del catión sustituyente  $A^+$ , donde el color turquesa corresponde a  $Cs^+$ , el amarillo a  $K^+$  y el rosa a  $Rb^+$ .



**Figura 9.** Espectros de absorción UV-Vis de la perovskita doble de referencia  $Cs_2AgBiBr_6$  y de los cinco candidatos con mayor actividad en el espectro visible ( $\sim 400\text{--}700$  nm). El recuadro muestra los valores de la brecha de energía calculados utilizando el funcional HSE06.

Si bien la absorción de la luz visible es un parámetro que limita la ECE, los procesos de transporte y de recolección de portadores de carga son factores que determinan la ECE efectiva [94] y, por lo tanto, requieren de una mayor

investigación. Por otra parte, de acuerdo con las cifras del límite de Shockley-Queisser en función de las brechas de energía reportadas por Rühle [86], se estima que la ECE teórica máxima para las perovskitas  $K_2AgSbI_6$ ,  $Rb_2AuBiBr_6$ ,  $K_2AgBiI_6$ ,  $Rb_2AgBiI_6$  y  $Rb_2AuSbI_6$  en celdas de unión simple son de 22.3 %, 27.2 %, 32.7 %, 32.8 % y 20.5 %, respectivamente [86]. Aunque, como se mencionó anteriormente, los materiales con brechas de energía indirectas resultan especialmente atractivos para el desarrollo de celdas solares de multiunión.

## Conclusiones

En este trabajo se presentó una metodología para el diseño teórico de perovskitas dobles análogas al sistema  $Cs_2AgBiBr_6$  empleando al factor de tolerancia de Goldschmidt, el factor octaédrico y el factor cuboctaédrico como criterios preliminares de la estabilidad estructural. De 2100 estructuras propuestas, solo 564 cumplieron con los tres intervalos de estabilidad de manera simultánea. Se llevaron a cabo cálculos de la estructura electrónica de los candidatos para determinar su brecha de energía prohibida y su absorción de radiación electromagnética. Se obtuvieron cinco perovskitas semiconductoras  $K_2AgSbI_6$ ,  $Rb_2AuBiBr_6$ ,  $K_2AgBiI_6$ ,  $Rb_2AgBiI_6$  y  $Rb_2AuSbI_6$  con una brecha de energía indirecta menor que 2 eV y la mayor absorción en la región visible de 400–700 nm. Estos materiales representan candidatos potenciales para ser sintetizados y utilizados como materiales fotoactivos en dispositivos de perovskita/Si en configuración tándem debido a la naturaleza indirecta de su brecha de energía prohibida.

## Referencias

- [1] Attfield JP, Lightfoot P, Morris RE. Perovskites. Dalton Trans 2015;44:10541–2. <https://doi.org/10.1039/C5DT90083B>.
- [2] Li G. Bulk- and Nanocrystalline-Halide Perovskite Light-Emitting Diodes. Advanced Nanomaterials for Solar Cells and Light Emitting Diodes 2019:305–41. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813647-8.00008-4>.
- [3] Bartel CJ, Sutton C, Goldsmith BR, Ouyang R, Musgrave CB, Ghiringhelli LM, et al. New tolerance factor to predict the stability of perovskite oxides and halides. Sci Adv 2019;5:eaa0693. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav0693>.
- [4] Hwang J, Rao RR, Giordano L, Katayama Y, Yu Y, Shao-Horn Y. Perovskites in catalysis and electrocatalysis. Science (1979) 2017;358. <https://doi.org/10.1126/science.aam7092>.

- [5] Yi T, Chen W, Cheng L, Bayliss RD, Lin F, Plews MR, et al. Investigating the Intercalation Chemistry of Alkali Ions in Fluoride Perovskites. *Chemistry of Materials* 2017;29. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b04181>.
- [6] Duan C, Tong J, Shang M, Nikodemski S, Sanders M, Ricote S, et al. Readily processed protonic ceramic fuel cells with high performance at low temperatures. *Science* (1979) 2015;349. <https://doi.org/10.1126/science.aab3987>.
- [7] Cohen RE. Origin of ferroelectricity in perovskite oxides. *Nature* 1992;358. <https://doi.org/10.1038/358136a0>.
- [8] Kovalenko M v., Protesescu L, Bodnarchuk MI. Properties and potential optoelectronic applications of lead halide perovskite nanocrystals. *Science* (1979) 2017;358. <https://doi.org/10.1126/science.aam7093>.
- [9] Correa-Baena JP, Saliba M, Buonassisi T, Grätzel M, Abate A, Tress W, et al. Promises and challenges of perovskite solar cells. *Science* (1979) 2017;358. <https://doi.org/10.1126/science.aam6323>.
- [10] Kim M cheol, Ham SY, Cheng D, Wynn TA, Jung HS, Meng YS. Advanced Characterization Techniques for Overcoming Challenges of Perovskite Solar Cell Materials. *Adv Energy Mater* 2021;11:1–26. <https://doi.org/10.1002/aenm.202001753>.
- [11] Perovskite Solar Cells n.d.
- [12] Kojima A, Teshima K, Shirai Y, Miyasaka T. Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. *J Am Chem Soc* 2009;131:6050–1. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>.
- [13] NREL Transforming Energy Best Research-Cell Efficiency Chart n.d.
- [14] Ravi VK, Mondal B, Nawale V v., Nag A. Don't let the lead out: New material chemistry approaches for sustainable lead halide perovskite solar cells. *ACS Omega* 2020;5. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04599>.
- [15] Bisquert J, Juarez-Perez EJ. The Causes of Degradation of Perovskite Solar Cells. *Journal of Physical Chemistry Letters* 2019;10. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.9b00613>.
- [16] Boyd CC, Cheacharoen R, Leijtens T, McGehee MD. Understanding Degradation Mechanisms and Improving Stability of Perovskite Photovoltaics. *Chem Rev* 2019;119. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00336>.
- [17] Li X, Du J, Duan H, Wang H, Fan L, Sun Y, et al. Moisture-preventing MAPbI<sub>3</sub> solar cells with high photovoltaic performance via multiple ligand engineering. *Nano Res* 2022;15. <https://doi.org/10.1007/s12274-021-3673-8>.
- [18] Ali R, Zhu ZG, Yan QB, Zheng QR, Su G, Laref A, et al. Compositional Engineering Study of Lead-Free Hybrid Perovskites for Solar Cell Applications. *ACS Appl Mater Interfaces* 2020. <https://doi.org/10.1021/acsmi.0c14595>.
- [19] Manshor NA, Wali Q, Wong KK, Muzakir SK, Fakhruddin A, Schmidt-Mende L, et al. Humidity: Versus photo-stability of metal halide perovskite films in a polymer matrix. *Physical Chemistry Chemical Physics* 2016;18. <https://doi.org/10.1039/c6cp03600g>.
- [20] Christians JA, Miranda Herrera PA, Kamat P v. Transformation of the excited state and photovoltaic efficiency of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite upon controlled exposure to humidified air. *J Am Chem Soc* 2015;137. <https://doi.org/10.1021/ja511132a>.
- [21] Lu R, Liu Y, Zhang J, Zhao D, Guo X, Li C. Highly efficient (200) oriented MAPbI<sub>3</sub> perovskite solar cells. *Chemical Engineering Journal* 2022;433. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133845>.
- [22] Qian J, Xu B, Tian W. A comprehensive theoretical study of halide perovskites ABX<sub>3</sub>. *Org Electron* 2016;37. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2016.05.046>.
- [23] Filip MR, Giustino F. The geometric blueprint of perovskites. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2018;115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1719179115>.
- [24] Travis W, Glover ENK, Bronstein H, Scanlon DO, Palgrave RG. On the application of the tolerance factor to inorganic and hybrid halide perovskites: A revised system. *Chem Sci* 2016;7. <https://doi.org/10.1039/c5sc04845a>.
- [25] Ghosh S, Shankar H, Kar P. Recent developments of lead-free halide double perovskites: a new superstar in the optoelectronic field. *Mater Adv* 2022;3:3742–65. <https://doi.org/10.1039/D2MA00071G>.
- [26] Li C, Lu X, Ding W, Feng L, Gao Y, Guo Z. Formability of ABX<sub>3</sub> (X = F, Cl, Br, I) halide perovskites. *Acta Crystallogr B* 2008;64. <https://doi.org/10.1107/S0108768108032734>.
- [27] Volonakis G, Haghhighrad AA, Milot RL, Sio WH, Filip MR, Wenger B, et al. Cs<sub>2</sub>InAgCl<sub>6</sub>: A New Lead-Free Halide Double Perovskite with Direct Band Gap. *Journal of Physical Chemistry Letters* 2017;8. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.6b02682>.
- [28] Xu J, Liu JB, Wang J, Liu BX, Huang B. Prediction of Novel p-Type Transparent Conductors in Layered Double Perovskites: A First-Principles Study. *Adv Funct Mater* 2018;28. <https://doi.org/10.1002/adfm.201800332>.
- [29] Zhao XG, Yang JH, Fu Y, Yang D, Xu Q, Yu L, et al. Design of Lead-Free Inorganic Halide Perovskites for Solar Cells via Cation-Transmutation. *J Am Chem Soc* 2017;139. <https://doi.org/10.1021/jacs.6b09645>.
- [30] Teng Q, Shi TT, Tian RY, Yang XB, Zhao YJ. Role of organic cations on hybrid halide perovskite CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> surfaces. *J Solid State Chem* 2018;258. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2017.10.029>.
- [31] Uribe JI, Ramirez D, Osorio-Guillén JM, Osorio J, Jaramillo F. CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>CaI<sub>3</sub> perovskite: Synthesis, characterization, and first-principles studies. *Journal of Physical Chemistry C* 2016;120. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b04207>.
- [32] Kieslich G, Sun S, Cheetham AK. Solid-state principles applied to organic-inorganic perovskites: New tricks for an old dog. *Chem Sci* 2014;5. <https://doi.org/10.1039/c4sc02211d>.
- [33] Ghosh S, Shankar H, Kar P. Recent developments of lead-free halide double perovskites: a new superstar in the optoelectronic field. *Cite This: Mater Adv* 2022;3:3742. <https://doi.org/10.1039/d2ma00071g>.
- [34] McMeekin DP, Sadoughi G, Rehman W, Eperon GE, Saliba M, Hörantner MT, et al. A mixed-cation lead mixed-halide perovskite absorber for tandem solar cells. *Science* (1979) 2016;351. <https://doi.org/10.1126/science.aad5845>.
- [35] Wolf NR, Connor BA, Slavney AH, Karunadasa HI. Doubling the Stakes: The Promise of Halide Double Perovskites. *Angewandte Chemie - International Edition* 2021;60. <https://doi.org/10.1002/anie.202016185>.
- [36] Karmakar A, Mukhopadhyay S, Gachod PGB, Mora-Gomez VA, Bernard GM, Brown A, et al. Uncovering Halogen Mixing and Octahedral Dynamics in Cs<sub>2</sub>SnX<sub>6</sub> by Multinuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. *Chemistry of Materials* 2021;33. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.1c01561>.
- [37] Xiao Z, Song Z, Yan Y. From Lead Halide Perovskites to Lead-Free Metal Halide Perovskites and Perovskite Derivatives. *Advanced Materials* 2019;31. <https://doi.org/10.1002/adma.201803792>.
- [38] Kakavelakis G, Gedda M, Panagiotopoulos A, Kymakis E, Anthopoulos TD, Petridis K. Metal Halide Perovskites for High-Energy Radiation Detection. *Advanced Science* 2020;7. <https://doi.org/10.1002/advs.202002098>.
- [39] Bartel CJ, Clary JM, Sutton C, Vigil-Fowler D, Goldsmith BR, Holder AM, et al. Inorganic Halide Double Perovskites with Optoelectronic Properties Modulated by Sublattice Mixing. *J Am Chem Soc* 2020;142. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b12440>.

- [40] Jain A, Voznyy O, Sargent EH. High-Throughput Screening of Lead-Free Perovskite-like Materials for Optoelectronic Applications. *Journal of Physical Chemistry C* 2017;121. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b02221>.
- [41] Slavney AH, Smaha RW, Smith IC, Jaffe A, Umeyama D, Karunadasa HI. Chemical Approaches to Addressing the Instability and Toxicity of Lead-Halide Perovskite Absorbers. *Inorg Chem* 2017;56. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.6b01336>.
- [42] Han D, Feng C, Du MH, Zhang T, Wang S, Tang G, et al. Design of High-Performance Lead-Free Quaternary Antiperovskites for Photovoltaics via Ion Type Inversion and Anion Ordering. *J Am Chem Soc* 2021;143. <https://doi.org/10.1021/jacs.1c06403>.
- [43] Tao Q, Xu P, Li M, Lu W. Machine learning for perovskite materials design and discovery. *NPJ Comput Mater* 2021;7. <https://doi.org/10.1038/s41524-021-00495-8>.
- [44] Ghrib T, Rached A, Algrafy E, Al-naumi IA, Albalawi H, Ashiq MGB, et al. A New Lead Free Double perovskites  $K_2Ti(Cl/Br)_6$ ; A promising materials for optoelectronic and transport properties; Probed by DFT. *Mater Chem Phys* 2021;264. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124435>.
- [45] Lee B do, Park WB, Lee JW, Kim M, Pyo M, Sohn KS. Discovery of Lead-Free Hybrid Organic/Inorganic Perovskites Using Metaheuristic-Driven DFT Calculations. *Chemistry of Materials* 2021;33. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.0c04499>.
- [46] Mathew NP, Kumar R, Radhakrishnan R. First principle study of Lead free halide double perovskites  $Cs_2AuBiX_6$  ( $X = Cl, Br$ ). *Mater Today Proc*, vol. 27, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.022>.
- [47] Mahmood Q, Alhossainy MH, Rashid MS, Flemban TH, Althib H, Alshahrani T, et al. First-principles study of lead-free double perovskites  $Rb_2TeX_6$  ( $X = Cl, Br$ , and I) for solar cells and renewable energy. *Mater Sci Eng B Solid State Mater Adv Technol* 2021;266. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115064>.
- [48] Nie R, Sumukam RR, Reddy SH, Banavoth M, Seok S il. Lead-free perovskite solar cells enabled by hetero-valent substitutes. *Energy Environ Sci* 2020;13. <https://doi.org/10.1039/d0ee01153c>.
- [49] Silveira JFRV, da Silva JLF. Mixed Halide Lead-free Double Perovskite Alloys for Band Gap Engineering. *ACS Appl Energy Mater* 2020;3. <https://doi.org/10.1021/acsaem.0c00739>.
- [50] Yang E, Luo X. Theoretical pressure-tuning bandgaps of double perovskites  $A_2(BB')X_6$  for photo-voltaics. *Solar Energy* 2020;207. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.104>.
- [51] Akkerman QA, Manna L. What Defines a Halide Perovskite? *ACS Energy Lett* 2020. <https://doi.org/10.1021/acsenenergylett.0c00039>.
- [52] Vasala S, Karppinen M.  $A_2B'B''O_6$  perovskites: A review. *Progress in Solid State Chemistry* 2015;43. <https://doi.org/10.1016/j.progsolidstchem.2014.08.001>.
- [53] Slavney AH, Hu T, Lindenberg AM, Karunadasa HI. A Bismuth-Halide Double Perovskite with Long Carrier Recombination Lifetime for Photovoltaic Applications. *J Am Chem Soc* 2016;138:2138–41. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b13294>.
- [54] McClure ET, Ball MR, Windl W, Woodward PM.  $Cs_2AgBiX_6$  ( $X = Br, Cl$ ): New Visible Light Absorbing, Lead-Free Halide Perovskite Semiconductors. *Chemistry of Materials* 2016;28. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b04231>.
- [55] Volonakis G, Filip MR, Haghghirad AA, Sakai N, Wenger B, Snaith HJ, et al. Lead-Free Halide Double Perovskites via Heterovalent Substitution of Noble Metals. *Journal of Physical Chemistry Letters* 2016;7. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.6b00376>.
- [56] Tran TT, Panella JR, Chamorro JR, Morey JR, McQueen TM. Designing indirect-direct bandgap transitions in double perovskites. *Mater Horiz* 2017;4. <https://doi.org/10.1039/c7mh00239d>.
- [57] Deng W, Deng ZY, He J, Wang M, Chen ZX, Wei SH, et al. Synthesis of  $Cs_2AgSbCl_6$  and improved optoelectronic properties of  $Cs_2AgSbCl_6/TiO_2$  heterostructure driven by the interface effect for lead-free double perovskites solar cells. *Appl Phys Lett* 2017;111. <https://doi.org/10.1063/1.4999192>.
- [58] Zhou J, Rong X, Molochev MS, Zhang X, Xia Z. Exploring the transposition effects on the electronic and optical properties of  $Cs_2AgSbCl_6$ : Via a combined computational-experimental approach. *J Mater Chem A Mater* 2018;6. <https://doi.org/10.1039/c7ta10062k>.
- [59] Wei F, Deng Z, Sun S, Zhang F, Evans DM, Kieslich G, et al. Synthesis and Properties of a Lead-Free Hybrid Double Perovskite:  $(CH_3NH_3)_2AgBiBr_6$ . *Chemistry of Materials* 2017;29. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b03944>.
- [60] Wei F, Deng Z, Sun S, Xie F, Kieslich G, Evans DM, et al. The synthesis, structure and electronic properties of a lead-free hybrid inorganic-organic double perovskite  $(MA)_2KBiCl_6$  ( $MA = methylammonium$ ). *Mater Horiz* 2016;3. <https://doi.org/10.1039/c6mh00053c>.
- [61] Lei H, Hardy D, Gao F. Lead-Free Double Perovskite  $Cs_2AgBiBr_6$ : Fundamentals, Applications, and Perspectives. *Adv Funct Mater* 2021;31. <https://doi.org/10.1002/adfm.202105898>.
- [62] Zhou H, Chen Q, Li G, Luo S, Song TB, Duan HS, et al. Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells. *Science (1979)* 2014;345. <https://doi.org/10.1126/science.1254050>.
- [63] Filip MR, Verdi C, Giustino F. GW Band Structures and Carrier Effective Masses of  $CH_3NH_3PbI_3$  and Hypothetical Perovskites of the Type  $APbI_3$ :  $A = NH_4, PH_4, AsH_4$ , and  $SbH_4$ . *Journal of Physical Chemistry C* 2015;119. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b07891>.
- [64] Feng HJ, Deng W, Yang K, Huang J, Zeng XC. Double Perovskite  $Cs_2BBiX_6$  ( $B = Ag, Cu$ ;  $X = Br, Cl$ )/ $TiO_2$  Heterojunction: An Efficient Pb-Free Perovskite Interface for Charge Extraction. *Journal of Physical Chemistry C* 2017;121. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b00138>.
- [65] Tripathi MN, Saha A, Singh S. Structural, elastic, electronic and optical properties of lead-free halide double perovskite  $Cs_2AgBiX_6$  ( $X = Cl, Br$ , and I). *Mater Res Express* 2019;6. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab48ba>.
- [66] Singh N, Agarwal A, Agarwal M. Performance evaluation of lead-free double-perovskite solar cell. *Opt Mater (Amst)* 2021;114:110964. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.110964>.
- [67] Greul E, Petrus ML, Binck A, Docampo P, Bein T. Highly stable, phase pure  $Cs_2AgBiBr_6$  double perovskite thin films for optoelectronic applications. *J Mater Chem A Mater* 2017;5. <https://doi.org/10.1039/c7ta06816f>.
- [68] Pan W, Wu H, Luo J, Deng Z, Ge C, Chen C, et al.  $Cs_2AgBiBr_6$  single-crystal X-ray detectors with a low detection limit. *Nat Photonics* 2017;11. <https://doi.org/10.1038/s41566-017-0012-4>.
- [69] Bartesaghi D, Slavney AH, Gélvez-Rueda MC, Connor BA, Grozema FC, Karunadasa HI, et al. Charge Carrier Dynamics in  $Cs_2AgBiBr_6$  Double Perovskite. *Journal of Physical Chemistry C* 2018;122. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b00572>.
- [70] Armer M, Höcker J, Büchner C, Häfele S, Dörflinger P, Sirtl MT, et al. Influence of crystallisation on the structural and optical properties of lead-free  $Cs_2AgBiBr_6$  perovskite crystals. *CrystEngComm* 2021;23. <https://doi.org/10.1039/d1ce00844g>.

- [71] Creutz SE, Crites EN, de Siena MC, Gamelin DR. Colloidal Nanocrystals of Lead-Free Double-Perovskite (Elpasolite) Semiconductors: Synthesis and Anion Exchange to Access New Materials. *Nano Lett* 2018;18. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b04659>.
- [72] Bekenstein Y, Dahl JC, Huang J, Osowiecki WT, Swabeck JK, Chan EM, et al. The Making and Breaking of Lead-Free Double Perovskite Nanocrystals of Cesium Silver-Bismuth Halide Compositions. *Nano Lett* 2018;18. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b00560>.
- [73] Ning W, Wang F, Wu B, Lu J, Yan Z, Liu X, et al. Long Electron–Hole Diffusion Length in High-Quality Lead-Free Double Perovskite Films. *Advanced Materials* 2018;30. <https://doi.org/10.1002/adma.201706246>.
- [74] Gao W, Ran C, Xi J, Jiao B, Zhang W, Wu M, et al. High-Quality Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> Double Perovskite Film for Lead-Free Inverted Planar Heterojunction Solar Cells with 2.2 % Efficiency. *ChemPhysChem* 2018;19. <https://doi.org/10.1002/cphc.201800346>.
- [75] Wu C, Zhang Q, Liu Y, Luo W, Guo X, Huang Z, et al. The Dawn of Lead-Free Perovskite Solar Cell: Highly Stable Double Perovskite Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> Film. *Advanced Science* 2018;5. <https://doi.org/10.1002/advs.201700759>.
- [76] Igbari F, Wang R, Wang ZK, Ma XJ, Wang Q, Wang KL, et al. Composition Stoichiometry of Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> Films for Highly Efficient Lead-Free Perovskite Solar Cells. *Nano Lett* 2019;19. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b00238>.
- [77] Yang X, Chen Y, Liu P, Xiang H, Wang W, Ran R, et al. Simultaneous Power Conversion Efficiency and Stability Enhancement of Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> Lead-Free Inorganic Perovskite Solar Cell through Adopting a Multifunctional Dye Interlayer. *Adv Funct Mater* 2020;30. <https://doi.org/10.1002/adfm.202001557>.
- [78] Tress W, Sirtl MT. Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> Double Perovskites as Lead-Free Alternatives for Perovskite Solar Cells? *Solar RRL* 2022;6. <https://doi.org/10.1002/solr.202100770>.
- [79] Xiao Z, Meng W, Wang J, Yan Y. Thermodynamic Stability and Defect Chemistry of Bismuth-Based Lead-Free Double Perovskites. *ChemSusChem* 2016;9. <https://doi.org/10.1002/cssc.201600771>.
- [80] Guechi N, Bouhemadou A, Bin-Omran S, Bourzami A, Louail L. Elastic, Optoelectronic and Thermoelectric Properties of the Lead-Free Halide Semiconductors Cs<sub>2</sub>AgBiX<sub>6</sub> (X = Cl, Br): Ab Initio Investigation. *J Electron Mater* 2018;47. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5962-2>.
- [81] Haque E, Hossain MA. Origin of ultra-low lattice thermal conductivity in Cs<sub>2</sub>BiAgX<sub>6</sub> (X=Cl, Br) and its impact on thermoelectric performance. *J Alloys Compd* 2018;748. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.137>.
- [82] Dong L, Sun S, Deng Z, Li W, Wei F, Qi Y, et al. Elastic properties and thermal expansion of lead-free halide double perovskite Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub>. *Comput Mater Sci* 2018;141. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.09.014>.
- [83] Filip MR, Hillman S, Haghghirad AA, Snaith HJ, Giustino F. Band Gaps of the Lead-Free Halide Double Perovskites Cs<sub>2</sub>BiAgCl<sub>6</sub> and Cs<sub>2</sub>BiAgBr<sub>6</sub> from Theory and Experiment. *Journal of Physical Chemistry Letters* 2016;7. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.6b01041>.
- [84] Savory CN, Walsh A, Scanlon DO. Can Pb-Free Halide Double Perovskites Support High-Efficiency Solar Cells? *ACS Energy Lett* 2016;1. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.6b00471>.
- [85] Ghebouli MA, Chihi T, Ghebouli B, Fatmi M. Study of the structural, elastic, electronic and optical properties of lead free halide double perovskites Cs<sub>2</sub>AgBiX<sub>6</sub> (X = Br, Cl). *Chinese Journal of Physics* 2018;56. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2018.01.004>.
- [86] Rühle S. Tabulated values of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells. *Solar Energy* 2016;130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.015>.
- [87] Tchounwou PB, Yedjou CG, Patlolla AK, Sutton DJ. Heavy metal toxicity and the environment. *EXS* 2012;101. [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6).
- [88] Cvjetko P, Cvjetko I, Pavlica M. Thallium toxicity in humans. *Arh Hig Rada Toksikol* 2010;61. <https://doi.org/10.2478/10004-1254-61-2010-1976>.
- [89] Montoya-Moreno A, García-Cruz R, Arellano JS, Poulain E, Lara-García HA, Olvera-Neria Ó. Perovskites in the absence of lead for efficient photovoltaic cells. Mexico City: 2022.
- [90] Morales-García Á, Valero R, Illas F. An Empirical, yet Practical Way to Predict the Band Gap in Solids by Using Density Functional Band Structure Calculations. *Journal of Physical Chemistry C* 2017;121. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b07421>.
- [91] Slimani H, Abid H, Benchehima M. Prediction of optoelectronic properties for BexZnyCd1-x-ySe quaternary alloys: First-principles study. *Optik (Stuttg)* 2019;198. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163288>.
- [92] R. Dovesi, A. Erba, R. Orlando, C. M. Zicovich-Wilson, B. Civalleri, L. Maschio, M. Rerat, S. Casassa, J. Baima, S. Salustro BK. *Crystal17*. WIREs Comput Mol Sci 2018;8.
- [93] Dovesi R, Saunders V, Roetti C, Orlando R, Zicovich-Wilson CM, Pascale F, et al. *CRYSTAL17 User's Manual*. 2018.
- [94] Lu N, Wang J, Geng D, Li L, Liu M. Understanding the transport mechanism of organic-inorganic perovskite solar cells: The effect of exciton or free-charge on diffusion length. *Org Electron* 2019;66. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2018.12.007>.

# UNAM: Cien años del muralismo mexicano

**Dafne Cruz Porchini**

Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM  
Universidad Nacional Autónoma de México. Calle Mario de la Cueva S/N, Coyoacán, 04510, CDMX, México

[dafne.cruzporchini@gmail.com](mailto:dafne.cruzporchini@gmail.com)

Este 2022 se conmemora el primer centenario del muralismo mexicano. Durante una celebración tan significativa, el Instituto de Investigaciones Estéticas (IIE) de la UNAM, colabora de manera estrecha con la Gaceta UNAM para difundir entre la comunidad las distintas lecturas y aportaciones de este movimiento artístico mexicano.

La historia del muralismo en México se explica a partir del inicio de los regímenes políticos emanados de la Revolución Mexicana. El presidente Álvaro Obregón emprendió la tarea de reconstrucción nacional y una parte central de esta labor fue la educación. Por ello, encomendó a José Vasconcelos —quien había sido Rector de la Universidad Nacional— la tarea de conformar una institución federal que se dedicara a la educación y alfabetización de la sociedad mexicana. Entre 1921 y 1922, Vasconcelos invitó a los pintores Roberto Montenegro y Diego Rivera a pintar en la Sala de Discusiones Libres de la Universidad —ubicada en el ex templo de San Pedro y San Pablo— y en el Anfiteatro Simón Bolívar de la Escuela Nacional Preparatoria. A estas obras murales siguieron otras en el mismo recinto, realizadas por jóvenes artistas quienes se enfrentaron por primera vez al espacio pictórico que representaban los muros. La consigna de Vasconcelos fue muy clara: “velocidad y superficie”.

El IIE ha sido pionero en los estudios de la pintura mural de la época moderna. Los libros y artículos de Fausto Ramírez, Jorge Alberto Manrique, Rita Eder, Alicia Azuela y Renato González Mello, han sido fundamentales para comprender la obra de Diego Rivera, José Clemente Orozco, David Alfaro Siqueiros, entre muchos otros. De igual manera, se ha llevado a cabo la catalogación y registro de casi todos los murales existentes en el país.

Es importante mencionar que la investigación sobre la pintura mural continúa y ha sido posible complejizarla en su discurso, gracias a los contenidos temáticos y visuales de los murales, los entornos arquitectónicos, las comisiones, la relación arte-política, y otros factores a los que se añaden nuevos hallazgos en cuanto a una amplia documentación gráfica y visual con la que ha ido avanzando la disciplina. De igual manera, las tesis de grado —especialización, maestría y doctorado— han generado un importante avance de la historiografía de la pintura mural en sus distintas etapas.

Uno de los aspectos que me gustaría señalar aquí son las colaboraciones interdisciplinarias para profundizar en el estudio de la pintura mural. Por ejemplo, al interior del Instituto se realizan actualmente investigaciones que abordan las técnicas de la pintura, basadas en un análisis científico del color y la misma materialidad. En estos estudios participan activamente el Laboratorio Nacional de Conservación e Investigación del Patrimonio Cultural (LANCIC) en colaboración con otras dependencias como el Instituto de Química, el Instituto de Física y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, en aras de una labor interdisciplinaria que establezca nuevas vías de análisis para la pintura mural en tanto patrimonio nacional.

En suma, el muralismo mexicano sigue generando estudios hacia el futuro.

Para la conmemoración de este año, la UNAM impulsa enfoques críticos, pero también propicia un acercamiento con los universitarios a través de la difusión de este movimiento artístico, considerado la más grande aportación de México al arte universal.

Queremos expresar nuestro agradecimiento a Isele Alvarado C., del Instituto de Investigaciones Estéticas de la UNAM, por el apoyo brindado para esta sección.

A continuación, incluimos la información de las imágenes en las páginas 1, 2, 9, 12, 16, 20, 21, 32, 38, 48, 56, 66, 84, 98, 149 y 150 de esta revista:

1: Arquitectura en México siglo XX, formatos mayores. ESTADIO OLÍMPICO UNIVERSITARIO. Autores: Pérez Palacio, Augusto, J. Jiménez y Salinas Moro. Lugar: Ciudad Universitaria. Fotógrafo: Vargas, Martín L. 1998. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

2: Arquitectura en México siglo XX, formatos mayores. RECTORIA. Autores: Moral, Enrique del y Mario Pani. Lugar: Ciudad Universitaria. Fotógrafo: González Cruz Manjarrez, Maricela. 1998. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

9: Fecha de la toma: 2011. Fotógrafos: Columba Sánchez y Gerardo Vázquez. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

12: Arquitectura en México siglo XX, diapositivas. ESCUELA DE DISEÑO INDUSTRIAL. Autor: Cacho, Raúl. Lugar: Ciudad Universitaria. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM. Desde Archivo Fotográfico.

16: Arquitectura en México siglo XX, formatos mayores. LA CIENCIA Y EL TRABAJO.

Autor: Chávez Morado, José. Lugar: Ciudad Universitaria, Unidad de Posgrado (Antigua Facultad de Ciencias)- Auditorio Alfonso Caso. Fotógrafo: Vargas, Martín L. 1998. Archivo Fotográfico "Manuel

Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

20: Arquitectura en México siglo XX, formatos mayores. AUDITORIO ALFONSO CASO. Autores: Cacho, Raúl, Peschard, Eugenio y Sánchez, Félix. Lugar: Torre II de Humanidades en Ciudad Universitaria. Fotógrafo: Ángeles Jiménez, Pedro (1964 - ). 2003. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

21: Arquitectura en México siglo XX, formatos mayores. AUDITORIO ALFONSO CASO. Autores: Cacho, Raúl, Peschard, Eugenio y Sánchez, Félix. Lugar: Torre II de Humanidades en Ciudad Universitaria. Fotógrafo: Ángeles Jiménez, Pedro (1964 - ). 2003. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

32: Arquitectura en México siglo XX, diapositivas. RECTORIA. Autores: Moral, Enrique Del y Mario Pani. Lugar: Ciudad Universitaria. Fotógrafo: Cuevas, Pedro. 1993. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

38: Fecha de la toma: 2011. Fotógrafos: Columba Sánchez y Gerardo Vázquez. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

48: Arquitectura en México siglo XX, diapositivas. RECTORIA. Autores: Moral, Enrique Del y Mario Pani. Lugar: Ciudad Universitaria. Fotógrafo: Brañas Ana Luisa. 1981/07/24. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

56: Arquitectura en México siglo XX, formatos mayores. EL RETORNO DE QUETZALCOATL. Autor: Chávez Morado, José. Lugar: Unidad de

Posgrado (Antigua Facultad de Ciencias), El mural ve hacia el sur de Ciudad Universitaria - Junto a la Biblioteca Luis Unikel, Anexo de la Facultad de Arquitectura. Fotógrafo: Vargas, Martín L. 1998. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

66: Arquitectura en México siglo XX, formatos mayores. LA CIENCIA Y EL TRABAJO. Autor: Chávez Morado, José. Lugar: Ciudad Universitaria, Unidad de Posgrado (Antigua Facultad De Ciencias)- Auditorio Alfonso Caso. Fotógrafo: Vargas, Martín L. 1998. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

84: Fecha de la toma: 2011. Fotógrafos: Columba Sánchez y Gerardo Vázquez. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

98: La superación del hombre por medio de la cultura. Fecha de la toma: 2011. Fotógrafos: Columba Sánchez y Gerardo Vázquez. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

149: Fecha de la toma: 2011. Fotógrafos: Columba Sánchez y Gerardo Vázquez. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

150: Desplegado del mural de la Biblioteca Central. Fecha de la toma: 2012. Fotógrafo: Ricardo Alvarado Tapia. Archivo Fotográfico "Manuel Toussaint", Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

## Apoyo a la docencia:

# Talleres de arte y ciencia

Astron Rigel Martínez Rosas

Asociación civil DiVU: Diversidad, cultura, género, alimentación y ciencia. CDMX, México  
CLUNI: DDC I7040509R4Q

[astronr@hotmail.com](mailto:astronr@hotmail.com)

### A todo, hallarle ciencia

Con creatividad y tiempo suficiente para observar sensiblemente nuestro entorno hallaremos que todo puede relacionarse con las ciencias naturales y exactas. Cualquier excusa es buena para hablar de ciencia, y eso es invaluable a la hora de elaborar talleres manuales o experiencias prácticas (ya sea para el alumnado de algún curso lectivo o para el público voluntario usuario de cualquier producto de divulgación científica).

Las dinámicas clases escolares de educación física, formación artística, poesía, baile o talleres extracurriculares son algunas de las predilectas del alumnado: despiertan grandes pasiones e interés durante las clases (muy en contraste con las lecciones de matemáticas o ciencias naturales). Esto no tiene que ser necesariamente así. Sabemos que la ciencia es útil y que también es bella. La ciencia es pertinente. El cuerpo docente lo sabe y lo verbaliza, pero rara vez lo muestra, quizá porque mostrarlo implica una titánica labor de empatía (ponernos en los zapatos de los educandos y saber qué es lo que les interesa y qué es lo que consideran valioso) y porque, definitivamente, consume bastante tiempo de planeación. Una forma de mostrar la pertinencia y utilidad del conocimiento es a través de talleres científicos y experiencias prácticas.

### Artes plásticas

Cualquier activista social que trabaje en la periferia puede reconocer que, incluso los centros educativos más remotos ubicados en lo profundo de la sierra cuentan con un par de canchas municipales de fútbol o básquet. Existen también improvisados equipos deportivos locales y sus entusiastas jugadores hallan la forma de uniformarse (y hasta de mandar a imprimir playeras personalizados para los participantes). Esto contrasta enormemente con los rezagados rincones de lectura (que tienen libros desactualizados, muchas veces producto de donaciones) y con sus laboratorios científicos escolares, que en su mayoría están conformados por reactivos caseros, algunos instrumentos y equipo básico, y son tan pequeños que en su totalidad pueden caber en un solo cajón.



Presentes, pero mucho más escasas, son las galerías, exposiciones temporales, casas de cultura, foros para representaciones escénicas, murales comunitarios o demás recintos destinados para la cultura y las artes. La falta de insumos de arte, costosos materiales especializados, sectarización, esnobismo de las Bellas Artes o sentido de no pertenencia son algunos de los factores que dificultan el involucramiento con las artes plásticas. No obstante, hallaremos notables excepciones en las artes utilitarias como el bordado, herrería, elaboración de muebles, y en las artes populares como la elaboración de artesanías para la venta. Un lápiz escolar y un trozo de hoja de cuaderno son, a veces, suficiente material para destacar a aquella talentosa persona interesada por el dibujo.

Existen manuales enteros y muchos videos disponibles en internet de cómo pueden explicarse conceptos de física clásica mediante llamativas demostraciones. “La ciencia en el deporte, la ingeniería de materiales aplicada al calzado deportivo y a los veloces autos de carreras”. Para las Bellas Artes diferentes de manualidades científicas infantiles hay muchos menos recursos virtuales, por lo que me he dado a la tarea de compartir aquí algunos cuantos materiales de mi autoría, utilizados durante un taller específico para población vulnerada y que dieron buenas experiencias en su ejecución.

## Objetivo y público objetivo

Diseñé esta experiencia de bajo o nulo presupuesto para aquellas personas interesadas en el arte contemporáneo, pintura de caballete, el autorretrato, el erotismo, los roles de género, las antigüedades, bisutería, juguetes, la conmisericación, el arte pop, la biografía y las historias de vida. Mi premisa para este taller es que los más variados (aparentemente inconexos) elementos de nuestro entorno, conjuntados con nuestras más íntimas experiencias personales y colectivas, pueden volverse arte (y también pueden volverse ciencia).

## Narrativa e hilo conductor

A la fecha de publicación de esta revista aún encontrará en exhibición (dentro del Museo Rufino Tamayo de Arte Contemporáneo en la Ciudad de México) la magna exposición del artista mexicano Julio Galán. No se angustie si no la pudo ir a ver. Aunque no haya oído de él nunca, sus pinturas las va a hallar en las más cotizadas colecciones del país, muestras internacionales, museos de toda la república, exposiciones temporales, libros de arte y en algunos recursos digitales a los que puede tener acceso de forma atemporal por internet.

El arte moderno y contemporáneo pueden generar sentimientos de animadversión, tanto como lo hacen la física cuántica o las matemáticas avanzadas. No obstante su rechazo, se tratan de manifestaciones que describen bastante bien el mundo en el que vivimos, nuestras problemáticas actuales y la forma en la que intelectualizamos nuestro entorno (y hablo tanto del arte contemporáneo como de los modelos de mecánica cuántica). Julio Galán percibió en su propia época la trascendencia de “temas de actualidad” que terminarían siendo tan recurrentes en nuestra vida moderna: depresión, egolatría, *selfies*, performatividad, victimismo, dismorfia corporal, sexo, drogas, diversidad, culto al cuerpo, dramatismo, producción en masa y consumo. En el taller se muestran varias de sus pinturas

mientras se da una charla (de la cual incluyo puntos clave) y se realizan experimentos y demostraciones científicas. A las personas usuarias del taller se les provee de tantos materiales escolares de arte como se tenga a la mano (pegamento, palitos de madera, crayolas, celofán de colores, pegamento, tijeras, sellos, acuarelas, materiales reutilizados, lápices de color, calcomanías, revistas, panfletos). Si se hace bajo la modalidad de invitación, se le puede pedir al público asistente que lleve copias de fotografías suyas, impresiones, cartas y objetos que tengan algún valor emocional o guarden alguna historia personal que quiera compartir con el grupo.

La actividad manual consiste en elaborar un personaje y después dotarlo de un buen contexto. La técnica es mixta, con una elevada cantidad de collage y asociación libre. Para apresurar el paso he llevado moldes prefabricados 3D hechos con abatelenguas de madera (*templetes*) ya pegados sobre una base de cartón blanco, listos para ser recubiertos por las personas usuarias del taller. También he probado imprimir las fichas de contenido científico comunicado (y sus respectivos coloreables) y llevarlas el día de la presentación. Esto me ha ayudado a subsanar la impuntualidad del público asistente con quienes trabajé, pues, de esta forma, quienes llegaron temprano podían adelantarse leyendo parte del contenido científico a tratar, familiarizarse con el vocabulario, hacer preguntas y elegir de entre las opciones aquel tema científico con el que más se identifiquen a nivel personal.



## Precisiones en torno a los talleres científicos

Muchas personas con una limitada formación en la comunicación científica o con poca experiencia dentro de la divulgación formal le harán creer que charlas participativas, pláticas que incluyan algún tipo de demostración o incluso conferencias ordinarias se tratan de verdaderos “talleres” (incluso los publicitan como tal, aunque no lo sean). Las modalidades tallerísticas pueden contener uno o varios elementos de las anteriores, no obstante, los talleres cuentan con elementos distintivos, entre los que podemos encontrar:

- ✓ A los talleres los construye la audiencia, no los talleristas. Un taller inicia escuchando las inquietudes e intereses particulares que llevaron a sus usuarios a tomarlo. Es en torno a esta *lista de deseos* y lluvia de ideas que se construye la narrativa del taller. No se trata de un montaje escénico prefabricado ni de una ponencia escrita en varios trozos de papel, sino de una construcción colectiva. Por lo tanto, cada presentación del taller es única e irrepetible.
- ✓ Deben ser flexibles. Tomando en cuenta el punto anterior, los talleres deben contar con todos aquellos elementos intelectuales, materiales, bibliográficos y de procesos para cambiar de rumbo en cualquier momento y atender las necesidades temporales, personales y espaciales durante cada repetición. Los talleristas y organizadores deben estar muy preparados con antelación y llevar muchísimos materiales adicionales (anticipando los posibles rumbos que pueda tomar durante su presentación para tal o cual audiencia específica). Mucho de lo que se lleve no será utilizado, por lo que debe evitarse meter el contenido preparado *con calza* o forzarlo a entrar (especialmente mientras se responde alguna pregunta con contenido que nada tiene que ver con lo que se solicita). Se sugiere ser resilientes y bastante tolerantes a la frustración.
- ✓ Deben ser, por lo tanto, suficientemente robustos y aceptar fácilmente las modificaciones de última hora realizadas *in situ*. Mi experiencia personal dentro del activismo social me ha permitido solucionar eventualidades de la manera más ingeniosa en la que pude hacerlo: improvisando reactivos químicos con equivalentes comerciales o productos artesanales disponibles en localidades alejadas; apelando a toda la cultura científica y popular que pudiera recordar, y haciendo uso de los datos móviles de mi celular para corroborar información o presentar videos de internet que respondieran dudas específicas.

- ✓ La línea narrativa de los talleres debe ser, en consecuencia, dinámica y completamente movable. Similar a aquellos libros *en los que decides tu propia historia*: “si quieres que Caperucita roja tome el camino pavimentado, ve a la página *tal*, pero si, en cambio, quieres que atraviese el bosque, sigue en la página *tal*”.
- ✓ Varios elementos podrán quedar fuera e, incluso, se generarán nuevos elementos y bloques enteros del taller al momento. Esto es, improvisando de la mejor manera posible, siempre apelando a nuestro conocimiento científico y apegado a prácticas basadas en evidencia.
- ✓ A nivel personal, aborrezco aquellos talleres de *manualidades científicas* en las que no se incluyan experiencias prácticas que hagan uso de reactivos químicos (especializados, poco conocidos o difíciles de conseguir), demostraciones experimentales con algún elevado grado de complejidad o algo que haga al público usuario entender que la experiencia colectiva, en vivo, al igual que la convivencia, valieron la pena y el esfuerzo de nuestra presencia física. Con la infodemia y tantos recursos digitales de acceso remoto disponibles 24/7 debemos ser capaces de ofrecer a nuestras audiencias “algo” que no estén en posibilidades de replicar en sus casas. Algo que les haga saber que valió la pena asistir a nuestros talleres científicos en lugar de consultar algún tutorial “hágalo usted mismo”, una clase por internet o una charla en *streaming*.

***Las obras de Julio Galán están llenas de preguntas sin resolver y nos obligan a ver más allá del cuadro, ir más allá de la experiencia estética. Se convierten entonces en una invitación abierta a la interpretación racional, a formular hipótesis, probar modelos y observar detenidamente los detalles. Es en este sentido que sus obras capturan la esencia de las ciencias naturales y exactas (que están empeñadas en hacer todo lo ya mencionado de forma sistemática, teniendo como base al caótico universo conocido). Al estudiar las creaciones artísticas y al estudiar el mundo natural haciendo uso de la ciencia buscamos muchas veces las mismas respuestas (escritas en diferentes lenguajes) de disciplinas que representan lo más elevado del alcance de la creatividad humana***

## Puntos clave del taller manual: El arte contemporáneo y la ciencia en las pinturas de Julio Galán

Cada una de las siguientes secciones (localizable como títulos subrayados y en cursiva) está encabezada por una pieza clave del artista. Le siguen obras complementarias que ilustran la narrativa propuesta para esa pintura en particular y la ficha de contenido científico que fue inspirada en dicha obra. Como se mencionó en las precisiones en torno a los talleres científicos, no hay un orden establecido para sendas secciones que son, en sí mismas, un contenido sugerido y el punto de partida para nuevas propuestas creativas interseccionales e interdisciplinarias.

### *Sácate una muela (1995)*



—Para esta fecha, Julio Galán ya era un artista reconocido. *El infante terrible* del arte contemporáneo mexicano.

—Con ella ganó el premio del MARCO en Monterrey, en 1994. Él estudió arquitectura en Monterrey.

—Nos habla del dolor físico (de sacarse una muela), aunque él toda la vida defendió que su dolor era más un dolor mental y psicológico (marcando distancia con artistas mexicanos con quienes lo comparaban, como Frida Kahlo).

—Ese sufrimiento lo podemos ver en *Piensas que no sufro* (1993), *Sin título* (1992) y *Retrato doble* (1986), que son pasteles, una técnica relativamente fácil de dominar. Julio Galán no tuvo educación formal en artes plásticas, tuvo un solo maestro de pintura, *que dice que no le gustó*. Así que sus carencias técnicas en obras tempranas como ésta son evidentes. Esto contrasta con óleos como *El mundo y mi mundo* (1991) o *Es media noche* (2003).

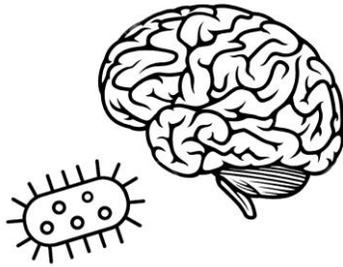


—Se le indica a alguna persona voluntaria que coloque algunas tabletas reveladoras de placa dentobacteriana en su boca y posteriormente enjuague con abundante agua. Puede entonces hablarse del *biofilm* en los dientes, microbiota bucal, demostración de una correcta técnica de cepillado (que cuida las encías, tan delicadas cuando hay gingivitis), entre otros temas. Soluciones de colorantes orgánicos disponibles en muchos laboratorios de química pueden reemplazar a las costosas tabletas comerciales, como fucsina, verde de malaquita o eritrosina.

—Incurción científica del texto Alzheimer y salud bucal:

*Aún no sabemos exactamente lo que causa el Alzheimer. Hace unos años, la comunidad médica se estremeció con la noticia que anunciaba la conexión entre una bacteria que causa gingivitis y la temida enfermedad. ¿Comenzar con una mala higiene bucal podría terminar acabando con su memoria? ¿Una muela podrida y*

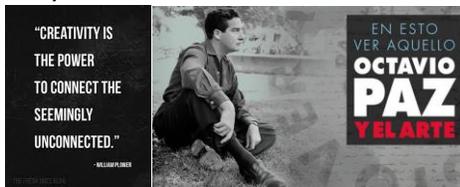
enciás inflamadas son suficientes para dañarle el cerebro? Se han hallado infiltraciones de la bacteria *Porphyromonas gingivalis* en



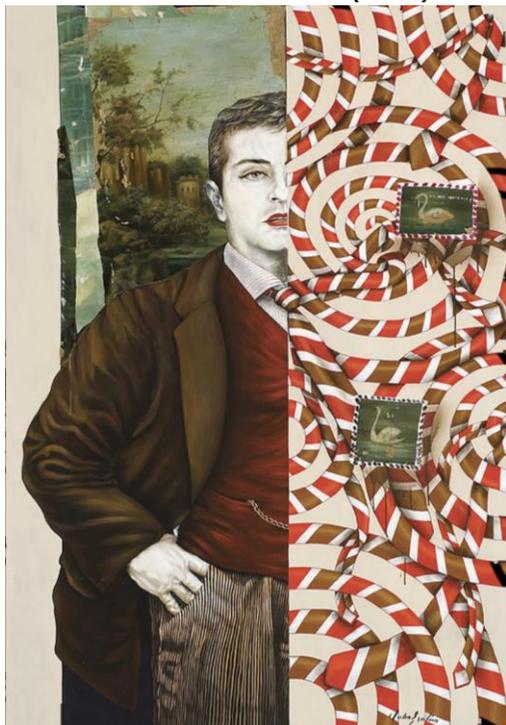
líquido ceforraquídeo y cerebros de pacientes con Alzheimer después de la autopsia. Enzimas de esta bacteria también se han encontrado asociadas a proteínas características del Alzheimer.

—Tanto la gingivitis como el Alzheimer son enfermedades inflamatorias y degenerativas, así que a alguien se le ocurrió pensar en una posible relación, hizo experimentos y aparentemente halló la conexión.

—Esto da pie para hablar de mi filosofía personal de vida: “La creatividad es el poder de conectar lo que aparentemente es inconexo”, William Plomer. “En esto, ver aquello”, Octavio Paz. La creatividad es el motor de manifestaciones como la ciencia básica y como el arte.



***Irradiation d' amour (2003)***



—Se trata de una pintura profesional hecha por un Julio maduro (un año antes de que dejara de pintar). Es un autorretrato, como muchas de sus obras.

—Ilustra muy bien los cambios que hacemos en nuestra persona para agradecerle a otras personas, por amor.

—Podemos incluso leer en los cisnes “no me quieres?, si”, que es un artificio propio de la lógica matemática y del lenguaje, ¿afirma que no lo quiere o corrige y dice que sí lo quiere? ¿Sí, no te quiero, o sí, sí te quiero? ¿No no te quiero es un sí?

—Julio Galán se heteronorma, se viste de dandi francés. Se hace nudos con su propia corbata. Los listones, cadenas, nudos y lazos son muy recurrentes en su obra.

—El fondo de utilería nos recuerda los tenebrosos castillos europeos y él mismo proyecta una apariencia vampiresca y clorótica en su piel.

—Otra pintura donde podemos ver sus fetiches *bondage*, *skin lampiño*, sumisión y entrega pasiva es en Cavayo Ballo (1987). Los listones y tiras se pueden ver en Secreto eterno (1987), Mis papás el día antes que supieran que yo iba a nacer (1988), Treinta y tres (paisaje con agujeros) (1991), Mis amigos secretos (1992), Lazos de familia (2002).

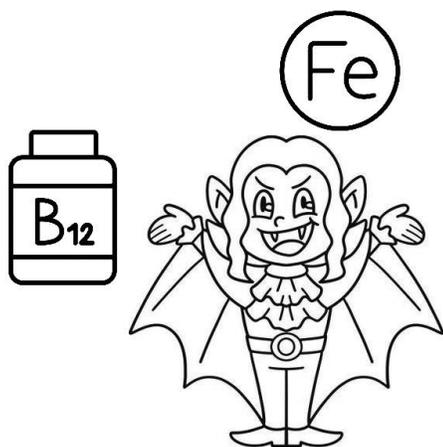


—Incurción científica del texto Clorosis y vampiros:

¿Recuerdan las amenazas que nos decían nuestros abuelos en la infancia: “si no comes te va a dar anemia”, “te voy a llevar al doctor para que te inyecten (muy dolorosas dosis de complejo B)”. En realidad, se trata de un temor infundado por sus propios ancestros que vivieron en un tiempo en el que, incluso en países avanzados, persistía un alto déficit alimentario y falta de vitaminas a causa de la desnutrición.

La clorosis y el “look clorótico” se volvieron tendencia entre las damas refinadas y “los afeminados” del siglo XIX. Todos querían estar a la moda luciendo sus débiles caras pálidas acompañadas de un aire melancólico y ausente. Estos y otros síntomas (característicos de la enfermedad clorótica a la que ahora llamamos anemia perniciosa) eran acentuados por la menstruación; el mal visto consumo de carnes rojas y otros alimentos de origen animal (que son las únicas fuentes naturales de vitamina B12), y la “pica” que orillaba al consumo de yeso, paredes, gis y demás sustancias alcalinas que impedían la correcta absorción del hierro y el complejo B en el estómago. Así se acentuaron también las leyendas de refinados vampiros y pálidas criaturas atormentadas habitantes de oscuros castillos europeos.

La clorosis se curaba recetando citrato férrico, leche y demás productos de origen animal que son ricos en complejo B. Actualmente se encuentra casi erradicada en el mundo occidental no precarizado.



—Las presentaciones farmacéuticas orales de vitamina B12 y complejo B suelen permitir abrir el frasco que las contiene y apreciar sus interesantes propiedades organolépticas: su olor recuerda al de la carne; su color rojizo da pie para hablar de los coloridos compuestos químicos de coordinación de metales como el cobalto y de la química bioinorgánica de la cobalamina y, finalmente, su sabor es bastante característico. Algo similar se puede hacer con tabletas de sulfato ferroso y la característica reacción química que ocurre al frotarlo entre los dedos y generar 1-octen-3-ona, de olor metálico.

**Sin título (2001)**



—Esta pintura fue la identidad gráfica de la magna exposición retrospectiva *Pensando en ti*, que se hizo en torno a Julio Galán en el museo de San Ildefonso.

—La corriente artística en la que podemos clasificar a Julio Galán es el neomexicanismo, caracterizado por el gran formato, autorretratos, elementos kitsch, alusiones críticas a lo que es la mexicanidad y el arte popular. Pueden verse también *Negro astuto, negro astuto* (1995) y *¡Quién te manda!* (1999).



—La exagerada carga dramática se ve acentuada con el fondo que recuerda los escenarios de los antiguos estudios fotográficos. Se ve una flor de magnolia mexicana (yoloxochitl)

y un cuarzo (SiO<sub>2</sub>) verdadero pegado a su frente, además de lágrimas de fantasía.

—Incurción científica del texto Vulgarenol para tratar cardiopatías:



No podría quedarle mejor el nombre al fragante árbol de yolxochitl, que traducido del náhuatl significa “flor del corazón”. Es utilizada desde tiempos prehispánicos para tratar enfermedades del corazón, falta de aliento, irrigación pulmonar y epilepsia. De forma natural

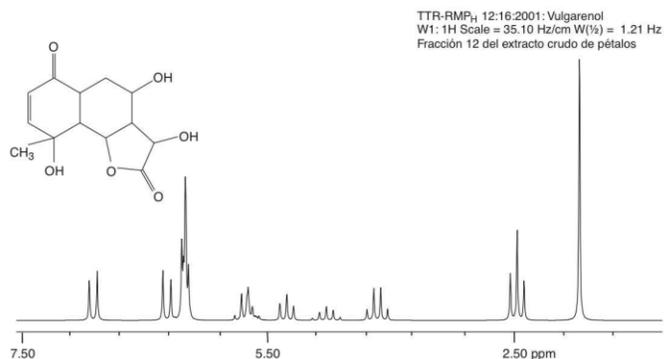
contiene vulgarenol y otras sustancias químicas que tienen efectos vasodilatadores (sí, como los Poppers) y aumentan la fuerza de las contracciones cardiacas (bombeando, entonces, más sangre con menos latidos).

—Estos estudios fotográficos con fondos falsos también los vemos en Mientras el cielo ríe, la tierra llora (1986) o Retrato de Elizabeth (2000), una vez más con brillitos falsos, bisutería, oropeles. Las esferas y bolitas que parecen desafiar las leyes de gravedad y flotar son también elementos muy recurrentes en su obra, véase Retrato de Golondrina (1984).



—Haciendo alusión a los materiales de origen vegetal; a las improntas, decoraciones, pedrería y objetos que Julio pegaba directamente en sus pinturas, y al juego escénico que propone en torno a cuestionar aquellos elementos que son meramente representativos, originales o de utilería, la actividad científica de tintes naturales queda perfecta. Se le indica al público asistente que haga una mancha o coloree un trozo de su cartón blanco de trabajo haciendo uso del jugo de flores machacadas, frotamiento de hojas verdes, salsas de comida, barras de chocolate, tierra rica en materia orgánica, zumo de frutas o cualquier sustancia tintórea de origen vegetal que puedan hallar en las proximidades físicas del espacio donde se realice el taller.

—Igual es una buena oportunidad para hablar de la espectroscopía, análisis cualitativo y de la ciencia básica aplicada a los productos naturales.



### Retrato de Luisa (1990)



—Es común ver flores y frutos en su obra, cargados de simbolismo (aunque no al grado de Sandro Botticelli).

—Flores poco comunes, como el terciopelo rojo (que se utiliza en la festividad del Día de Muertos) en Retrato de Luisa (1990) o los higos cristalizados en Querida (1999).

—Incurción científica del texto Los higos son flores:



Los higos no son frutas, sino un tipo de inflorescencia muy particular. Pero no es la primera vez que usted se come los órganos sexuales de las plantas (a los que llamamos flores). Existen numerosos ejemplos de flores comestibles que van más allá de la flor de calabaza, jamaica y demás infusiones.

Muchas verduras son, en el sentido botánico estricto de la palabra, frutas. Así que el jitomate y el aguacate son frutas (más específicamente, bayas), muchas nueces son frutas... los hongos no son ni frutas ni verduras, porque ni siquiera son plantas (pertenecen a otro reino taxonómico de organismos).

—Más flores y frutos en Querida (1999), Mara (2000), Sin título (2003), Luminosa (2004), Con Yolanda y sin Yolanda (1987), Sin título (1986), El que se viene se va (2003), Relámpagos naranjas (s/f), Después de tanto (1988).



—Justamente en la pintura Mara (2000) puede verse un antiguo pomo de morfina, como el que se usaba en las antiguas boticas. Con un contenido científico que va de la mano con lo explicado en la sección “Sin título (2001)” puede hablarse de la morfina

(y sus derivados químicos sintéticos, como la heroína) que provienen de fuentes naturales como el latex de la popular flor escarlata de amapola.

—Los pétalos debidamente desinfectados de la planta híbrida que llamamos “pensamientos” (*Viola x wittrockiana*), retratada en El que se viene se va (2003), son comestibles. En Relámpagos naranjas (s/f) aparecen las célebres naranjas de Nuevo León, estado donde tanto tiempo vivió.

—Puede realizarse la experiencia práctica de disección de flores y frutos, que tiene como finalidad la identificación de órganos reproductores, estructuras y tejidos vegetales. Se recomienda la asesoría de biólogos capacitados en anatomía vegetal para guiar la actividad.

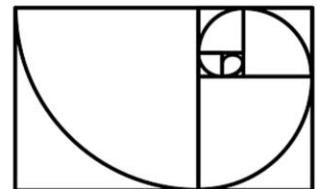
—De igual manera se recomienda el video corto de divulgación científica “What’s the difference between fruits & vegetables?” en la liga: <https://www.youtube.com/watch?v=a6nKRTG-L4k&list=FLD8nczmejXTpDOKE97ZgmRQ&index=5>

**Retrato de María Elisa (1999)**



—La autosimilitud, elementos que se repiten a diferente escala en sus pinturas, patrones geométricos y claro, la presencia de manchas, garabatos y aparente desorden, evocan a los órdenes superiores que propone la geometría fractal.

—Incurción científica del texto Fractales:



Existen entes matemáticos complejos llamados fractales. Cuando se descubrieron (hace unos cien años) revolucionaron la geometría clásica, proponiendo figuras con perímetros que tendían a valores

infinitos delimitados en áreas conocidas, y que tenían extrañas formas y ramificaciones que son parecidas entre sí (y al resto de la figura), entre otras extrañas propiedades.

En la antigüedad, otras “geometrías divinas” ya habían sido estudiadas en un intento por explicar la belleza y las proporciones halladas en la naturaleza, como la famosa Espiral áurea y la Regla de los tercios. Desde los grandes arquitectos y escultores del mundo clásico hasta los pintores del renacimiento, estas proporciones fueron establecidas como el canon de belleza hegemónica que todos debían imitar para alcanzar la perfección.

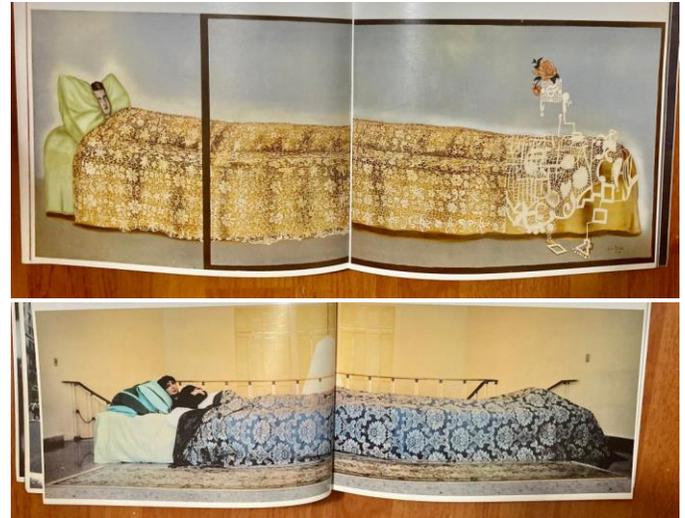
Por otra parte, los fractales proponían un orden superior aún más ambicioso y mucho menos intuitivo. Los extravagantes patrones formados por las ramas secas de los árboles; nuestro intrincado sistema circulatorio de vasos sanguíneos; las costas y fronteras geográficas de los mapas, y los turbulentos remolinos de aire son ejemplos de arreglos aparentemente desordenados y caóticos, pero que resultaron tener un arreglo bastante característico. Un arreglo fractal (que les confiere ventajas físicas). La autosimilitud a diferentes escalas y los complejos bordes (perímetro) irregulares son algunas de sus características más visibles.

—No es raro hallar fractales en pintura. Los ejemplos presentes en el expresionismo abstracto, como Jackson Pollock, han sido estudiados científicamente.

—Podemos verlos en toda la obra de Julio Galán, particularmente en Ya no (1988), El mundo y mi mundo (1991), Sin título (2003) y No tengo hambre (1999), que evoca los cuadros de la última cena reinterpretados por quien fuera su amigo, Andy Warhol.



—Sobre la autopercepción, la exageración y la desproporcionalidad podemos ver Roma (1990) y la foto de donde salió.



—Le gustaba intervenir réplicas de bustos clásicos para generar esculturas kitsch. Se cuenta que se negaron a venderle una pieza arqueológica original de mármol al enterarse de lo que pretendía hacerle. A manera de performance, igual intervino una escultura pública en San Pedro Garza García, el municipio con mayor ingreso per cápita de Latinoamérica.



—Con unas cuantas iteraciones matemáticas básicas, conocimiento elemental de geometría, una regla y un lápiz, es posible hacer su propio fractal de Koch (también llamado Fractal copo de nieve), bastante parecido al que se muestra en el texto científico complementario y su respectivo coloreable.

—Lo anterior también aplica para elaborar la “Espiral divina” que acompaña al fractal. Con esto se puede estimar un valor aproximado de  $\phi$  (la proporción áurea o valor dorado), resolver series numéricas y hablar de números irracionales.

**Mandarín (1993)**



—El travestismo es un ejercicio común en el arte. “Parece que somos más fieles a nosotros mismos cuando nos travestimos”.  
 —Los bordados en *Mandarín* (1993) son *carpetitas* tejidas que él pegó directo en el lienzo.  
 —Acentúa la idealización que tiene del cuerpo masculino como objeto de deseo, adornando dichos cuadros con joyas, lentes oscuros de marca y muselinas. El ejemplo más claro es *Hungry proof* (1996) y las pinturas de 2001: *Giocco-Contro-me* (2001), *Brillette* (2001), *Misael* (2001) y *Lissie Is Back* (2001).



—Retomando el tema de China en la pintura *Mandarín* (1993) y *Vas a terminar conmigo* (1995), se prosigue a la elaboración de pólvora (un invento chino) con azufre en polvo, carbón vegetal y nitrato de potasio. La demostración es bastante vistosa y debe realizarse en un lugar ventilado. El libro infantil gratuito *El príncipe y el caballero*, editado por DiVU a.c. (2020), tiene el protocolo experimental completo y cuenta con los reactivos físicos necesarios para realizarlo (en bolsitas individuales adheridas al mismo libro).

—La reconocida fotógrafa mexicana Graciela Iturbide (autora también de las fotografías más famosas de mujeres empoderadas en Juchitán y de su *tercer sexo* travestido, los *Muxes*) retrató a Julio Galán en varias ocasiones.

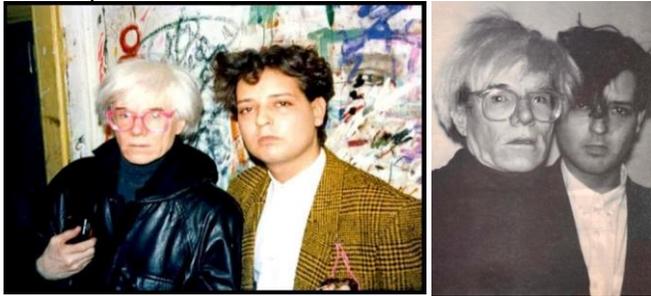


**Julio Galán conmigo (1997)**

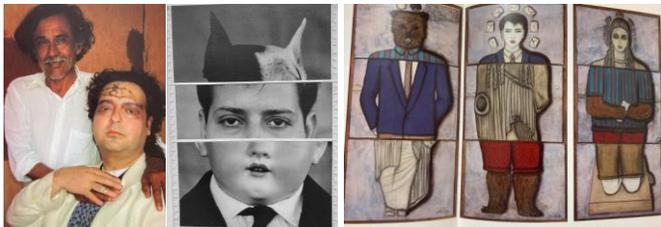


—Julio Galán odiaba las clasificaciones académicas, que lo encasillaran dentro de corrientes artísticas o que lo asociaran con otros artistas, aunque en muchas pinturas, las comparaciones se antojen muchísimo, como en el caso de esta pintura con Las dos Fridas, de Frida Kahlo.

—En otra de mis secciones hablo de su pintura No tengo hambre (1999), alusiva a algunas obras postreras de quien fuera su maestro y amigo Andy Warhol, el pináculo y quizá el máximo representante del Arte Pop. Warhol llegaría a considerar a Galán como “el mejor pintor mexicano de todos los tiempos”.

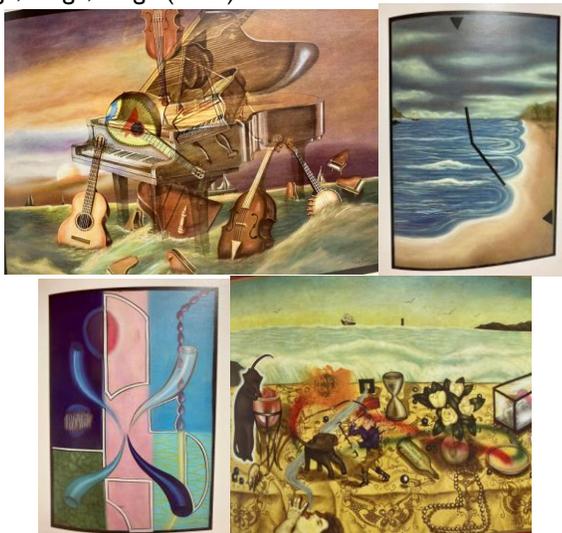


—Hay guiños que recuerdan al Expresionismo en todo su cuerpo de obra, y algunas críticas de arte como Raquel Tibol lo clasifican dentro del Neomexicanismo.



—También hallaremos ejercicios propios del Surrealismo, como el cadáver exquisito, ya sea en fotografía o en pinturas como Autorretrato con oso, la estatua y la carta de adiós (1983).

—Elementos icónicos de esta corriente (el mar, los vasos comunicantes, elefantes, relojes, instrumentos musicales) los hallamos en varias de sus pinturas: El piano sin pianista (2003), Mi reloj (1988), Hmaran, me haces llorar (1990) y sobre todo Tange, tange, tange (1988).

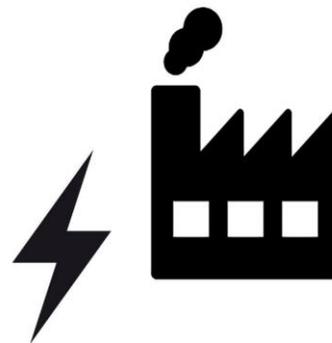


—Igual que el fenómeno físico del electromagnetismo, Julio Galán tiene la esencia del siglo XX en sus estilos. Vemos un rayo que sale de sus manos en Sin título (desde aquí yo ya no respondo por nada) (1984) y estática en Faraday (2003) o en la última pintura que realizó antes de retirarse del mundo del arte y dejar el pincel para siempre, de forma voluntaria, Tout ce qui brille (Todo lo que brilla) (2004).



— Como solo los grandes, fue después de Todo lo que brilla (2004) que dijo que ya había dicho todo lo que él tenía que decir a través de sus pinturas y guardó silencio. Dejó de dar entrevistas, recibir gente en su casa, hablar con amigos y asistir a fiestas. Moriría dos años después a bordo de un avión, tal como lo predijeron adivinas a quienes iba para que le leyeran las cartas (pero a causa de un infarto, no de un accidente aéreo). Durante ese tiempo cumplió su promesa, como así lo hiciera Sor Juana en el siglo XVII, y perjuró del arte.

—Incursión científica del texto de Electromagnetismo e industrialización.



*En menos de cien años “domamos” a la electricidad (y también la hicimos redituable económicamente). Ese tiempo fue suficiente para que los científicos de la época llegaran a las leyes del electromagnetismo y para que los inventores la pusieran al servicio de la producción manufacturera en lo*

*que ahora conocemos como la Segunda Revolución Industrial. Y así pasamos de las máquinas de vapor (y la termodinámica) a las bobinas de los motores eléctricos.*

*Los investigadores se volvieron empresarios y los empresarios comenzaron a interesarse por hacer investigación científica y tecnológica. Surgieron las patentes modernas y también los congresos científicos financiados por magnates. Llegamos entonces a la industrialización y maquinización del siglo XX. La historia completa del arte moderno da cuenta de ello: pasamos de la producción artesanal a la masificación y el Arte Pop. La piroxilina*

de Siqueiros y la pintura acrílica nacieron como materiales industriales. La reproducción mecánica pasó del bastidor serigráfico y el grabado policromo a las revistas a color, los anuncios de neón y la televisión por paga.

—A propósito de los materiales de arte especializados, los lápices de grafito muy suave (8B) son perfectos para demostrar la capacidad conductora de la corriente eléctrica del carbón. Se debe dibujar un grueso “camino eléctrico” ininterrumpido en un trozo de cartón para cerrar el circuito entre una batería y una resistencia (un pequeño foquito LED funciona perfecto). Una lupa de aumento es suficiente para entender por qué un lápiz ordinario (No. 2) deja rastros discontinuos de grafito y no es capaz de cerrar los circuitos. Igual que esta experiencia, muchas otras demostraciones de eléctrica y electrónica pueden adaptarse a esta sección.

**Niño en la cama (1983)**



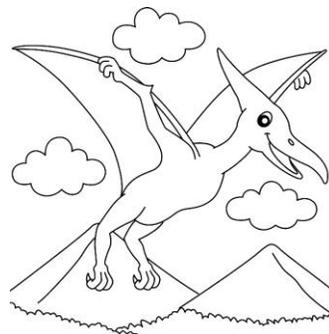
—Julio Galán fue abusado sexualmente durante su infancia en su natal pueblo de Múzquiz, Coahuila, por clérigos que él retrata en sus pinturas como osos negros. También podemos verlos en *Sí puedes, pero no debes* (1985). —A su madre la representa como un cordero blanco, evidente en *Retrato de María Eliza Romo* (2001) en donde también hace alusión a su apodo de la infancia “pollo”.



—Con lo anterior también podemos entender cómo los temas religiosos son recurrentes en sus obras. *Niño adormecido por ti* (1986), *Mientras me despierto* (1985) o *Signo secreto* (1999).



—Incurción científica del texto Muzquiz en la ciencia:



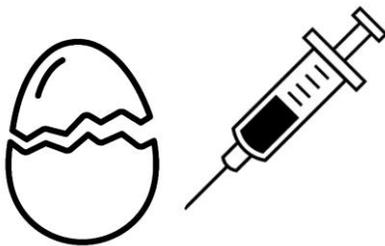
El estado de Coahuila es internacionalmente reconocido como una de las zonas más importantes de fósiles de dinosaurios en todo el mundo. Tan importante que los Coahuilaceratops y muchos otros reptiles extintos llevan este norteño estado fronterizo en su nombre.

Tanto en los municipios colindantes como en el pueblo natal de Julio Galán, Múzquiz, se encuentra la reserva de osos negros más importantes de México. Este municipio también fue el foco de atención científica a principios de los años 2000 cuando se reportó el hallazgo de un fósil único en su tipo, adornando la chimenea de la casa particular de un burócrata minero. Se trata de un reptil volador (extinto hace 66 millones de años) perteneciente al orden de los pterosaurios, que podía alcanzar los dos metros de envergadura, y que lleva por nombre *Muzquizopteryx coahuilensis*.

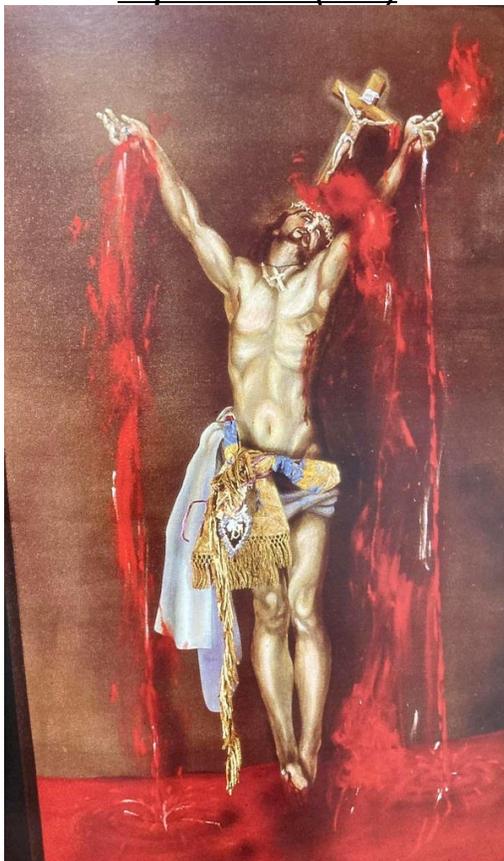
—Las plumas, aves (no solo pollos) y otros animales voladores son elementos recurrentes en sus pinturas. —Incurción científica del texto Huevos en el refrigerador.

Si su refrigerador es de alguna marca estadounidense habrá notado que cuenta con compartimentos especiales para colocar huevo. En Latinoamérica, Europa y Asia no tenemos la costumbre de refrigerarlos (ni en la casa ni en los centros comerciales). ¿Por qué entonces los gringos sí lo hacen? Pues resulta que así evitan la proliferación de microorganismos en su interior. ¿Pero por qué entonces los huevos que ellos producen tienen bacterias y los que nosotros producimos no?

Importantes brotes epidemiológicos históricos en el ganado y cultivos de todas las regiones mencionadas han dado como resultado estrictas normas y leyes en materia de producción animal. Aquí en México ya sufrimos la devastación de la fiebre aftosa y aprendimos la lección, por lo que ahora vacunamos a las aves de corral contra la salmonela; tenemos estrictos controles en cuanto a la cantidad de soya y almidón que agregamos a las carnes procesadas como embutidos y atún; llevamos más de 20 años cultivando algodón transgénico resistente a plagas, y los acaricidas y tratamiento químico de la lana de oveja y cuero curtido han frenado el avance de la rickettsiosis y otras enfermedades zoonóticas en la frontera con Estados Unidos. La salmonelosis es un grave problema para los gringos, pues sus aves no suelen estar vacunadas, además de que ellos lavan sus huevos (retirando así la capa exterior que naturalmente los protege de contaminaciones externas). Y es así como los movimientos antivacunas, antitransgénicos y quimiofóbicos de nuestros vecinos del norte han llegado hasta el diseño de nuestros refrigeradores.



**Capital Amour (1997)**



—Los fluidos corporales son vitales para Galán. Hay cantidades pornográficas de sangre en esta pintura, así como en Mi rey (1992). A lo largo de su obra hallaremos lágrimas verdaderas y falsas, mismas que pueden ser fluidas y corrosivas, o estáticas y de fantasía, como en Douleur-profonde (2003) en donde también aparece una *carpetita* tejida, magistralmente pintada al óleo, en contestación a la crítica de Mandarin (1993).



—El protagonismo de los fluidos corporales recuerda algunas piezas de los artistas británicos Gilbert y George. La carga visual de la sangre recuerda aquellas pinturas elaboradas con sangre menstrual. El semen es muy recurrente en su obra (de manera simbólica y no física, como algunas obras de José Luis Cuevas que sí lo incluyen). Alusiones a lo anterior y a la masturbación se les puede hallar en Pensando en ti (1992), El necesitado de amor (1998), Volveré por ti (con Dios) (2001) y Retrato de Rafael (1991).



—Incursión científica del texto Ensayos sobre la orina:

Un estudio clínico de laboratorio llamado Examen General de Orina puede servir para detectar problemas en riñones, vejiga y uretra, tales como infección de vías urinarias o los inicios de cálculos renales. El estudio de la bilis, las lágrimas, el semen, la sangre y la orina se remonta miles de años atrás con la teoría de los “humores”. La curiosidad y ambición de los últimos alquimistas que vivieron en el siglo XVII los llevó a destilar orina humana en retortas de vidrio en su búsqueda por hallar la piedra filosofal. Nunca lo lograron, pero en su camino aislaron por primera vez al elemento químico fósforo.



—Un examen general de orina casi completo (faltando solo la lectura de sedimento urinario en microscopio) es posible de realizar en vivo y a todo color durante el taller. Solo se requiere la orina de alguna persona voluntaria en un tubo de ensayo o vaso clínico, una sanita de papel y las tiras reactivas comerciales para EGO (pueden regalarle un par en el laboratorio clínico de algún centro de salud público). Se compara la coloración con una guía impresa de los valores.

**La cena (s.f.)**



—Las antigüedades (y su respectiva patina) son elementos que él imitaba muchísimo en sus cuadros. La que es considerada su primera pintura, La cena (s.f.), ya contiene muchos de los elementos que lo acompañarían durante toda su vida.

—Por la naturaleza misma de sus obras, algunas ya se están degradando. Las lábiles tintas de impresión sobre papeles comerciales que no son libres de ácido de las revistas, fotografías y recortes en papeles fotosensibles muestran un claro deterioro, si comparamos imágenes de catálogos con las piezas en su estado actual. Lo anterior es bastante irónico, considerando que él mismo “envejecía” artificialmente sus oleos (haciéndolos parecer antigüedades, que tan afanosamente coleccionaba) colocando pátinas falsas.



—Además de antigüedades tenía una debilidad por los muñecos y los juguetes. En vida, su inseparable compañero de viaje era Morelio, que tiene una novia que se llama Aurelia. Se puede ver a Morelio en El viaje en la noche (1999) y a sus artículos de colección en fotografías que retratan una de sus fiestas de té.



—De la intimidad de su habitación a la escena pública. Desde muy joven, Julio Galán se relacionó con populares artistas y celebridades. Se le puede ver retratado con Johny Depp, Carlos Monsivais, el galerista Memo Sepúlveda (quien fuera su mecenas y amigo), Boy George, Isabela Roselini, Ana Torroja...



**Una última consideración...**

El siglo XX debió enseñarnos a convivir armónicamente con nuestras diferencias. Démosle al siglo XXI la oportunidad de enseñarnos a trabajar por la inclusión total, dentro de una educación plural e interdisciplinaria.

Sirva (al menos algo de todo) lo anteriormente presentado como punto de partida para sus propias acciones pedagógicas o de incidencia. Permita que las creaciones artísticas y científicas aquí reunidas hablen por sí mismas.



