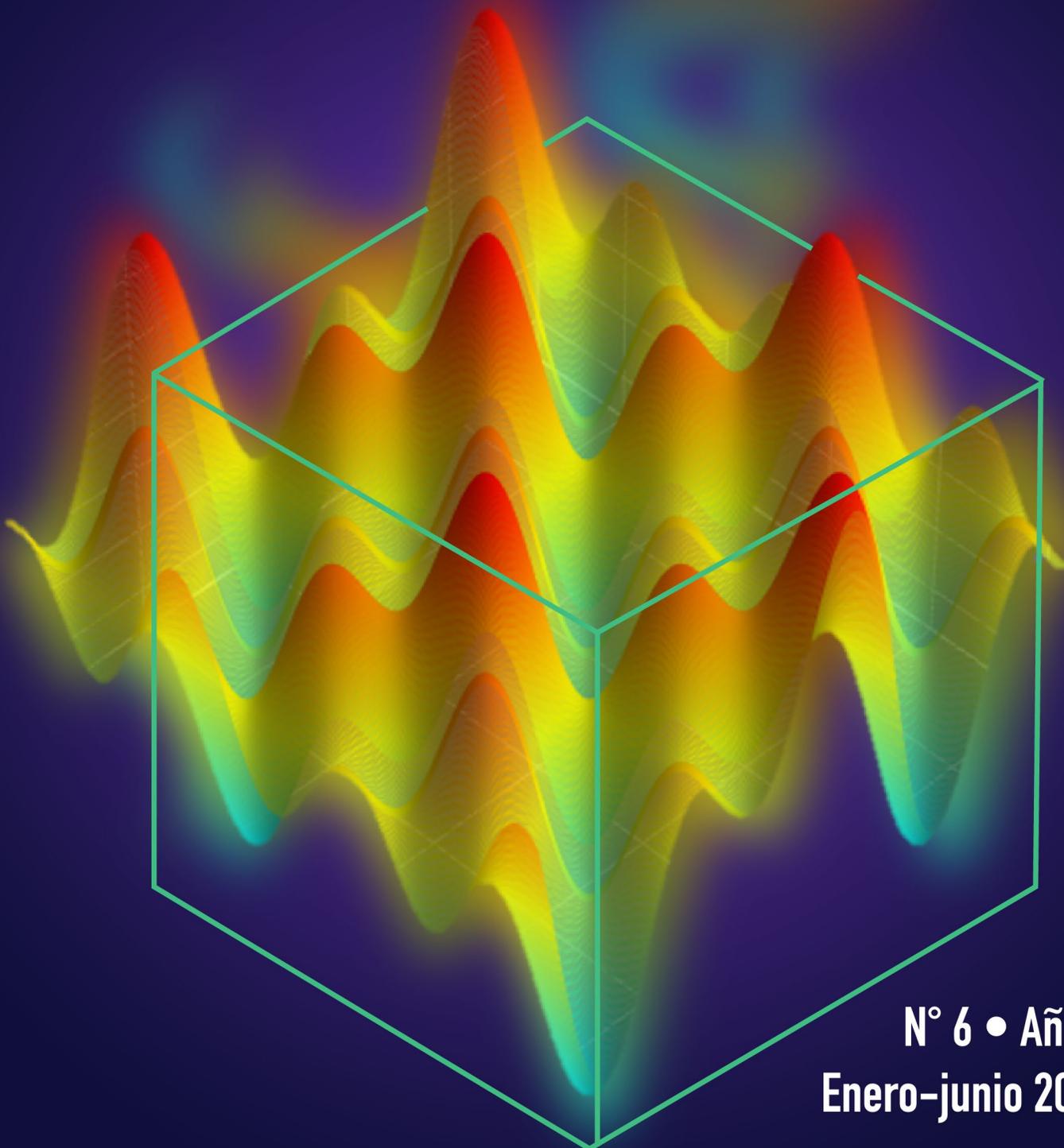


# Materiales Avanzados

ISSN: en trámite



N° 6 • Año 4  
Enero-junio 2025

# Universidad Nacional Autónoma de México

## **Rector**

Leonardo Lomelí Vanegas

## **Secretaría General**

Patricia Dávila Aranda

## **Coordinadora de la Investigación Científica**

María Soledad Funes Argüello

# Instituto de Investigaciones en Materiales

## **Director**

Diego Solís Ibarra

## **Secretario Académico**

Jaime Enrique Lima Muñoz

## **Editora Responsable**

Maricela Zapata Arroyo

## **Coordinador Editorial y de Divulgación**

Astron Rigel Martínez Rosas

## **Comité Editorial**

Armando Reyes Montero

Chumin Wang Chen

Elí Sánchez González

Joaquín de la Torre Medina

Michel Rivero Corona

## **Producción Editorial**

Editora Científica: Maricela Zapata Arroyo

Gestora Editorial y de Difusión: Julieta Reyes Arango

Técnico Digital: Omar Alejandro Pompa García y Oscar Luna Cruz

Diseñadora Editorial: Celic Martínez Cañedo

Espectro en Portada: Patricio Rodrigo Rosales Limón



Instituto de  
Investigaciones  
en Materiales

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.

## Presentación

El presente número de la revista Materiales Avanzados muestra una diversidad de temas relacionados con los materiales que presentan cambios de fase, su investigación y aplicaciones, así como su importancia dentro de las prácticas sostenibles. En este sentido, también se explora el uso de la luz solar en la decoloración de aguas residuales y artículos que exploran las propiedades viscoelásticas de alimentos semisólidos, ensayos bajo cizalla oscilatoria y ejemplos en subproductos de aguacate. Se abordan temas relacionados con medios granulares y su lugar en la ciencia y tecnología. También encontrará la importancia del acero y su impacto en el medio ambiente: Estrategias e innovaciones para mitigar las emisiones de dióxido de carbono en la industria siderúrgica. Se explora la reología dilatacional de proteínas en interfase fluida y el estudio del comportamiento reológico de un sistema gelante empleando el principio de superposición tiempo-temperatura-concentración. También encontrará un artículo relacionado con los cúmulos metálicos, ¿cómo identificar su estructura más estable?, hablaremos de las heteroestructuras de perovskitas de haluro, de la importancia de los oleogeles como sustitutos de grasa en el área alimentaria y farmacéutica, así como también se aborda el tema de un termómetro con función de autocalibración *in situ* en la temperatura de Curie en materiales ferroeléctricos, se muestra el tema de los biomateriales para medicina regenerativa I, así como también el tema de ¿cómo se comporta mecánicamente una mermelada de nopal? Y, para cerrar este número 42, el material de apoyo a la docencia comparte una parte del material didáctico utilizado en el evento de divulgación científica más concurrido del país, Noche de las Estrellas, en su emisión de 2024 Morelia y CU.

Con este variado contenido damos continuidad al número anterior y abrimos la puerta para nuestra próxima entrega, solo nos queda

agradecer su preferencia y desearles que las propuestas de comunicación científica que tenemos para ustedes sean de su agrado.

Maricela Zapata Arroyo  
Editora responsable

## Editorial

MATERIALES AVANZADOS, Año 4, No. 6, enero-junio 2025, es una publicación semestral editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, a través del Instituto de Investigaciones en Materiales, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, Tel. (55)56224500 y (55)56224587, URL: <https://revista.iim.unam.mx/>, correo electrónico: [revista@materiales.unam.mx](mailto:revista@materiales.unam.mx). Editora responsable: Mtra. Maricela Zapata Arroyo, correo electrónico: [mzapata@materiales.unam.mx](mailto:mzapata@materiales.unam.mx). Reserva de Derechos al uso Exclusivo 04-2023-062711234500-102, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Coordinación Editorial del Instituto de Investigaciones en Materiales, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, fecha de la última modificación 15 de febrero de 2025.

El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores y no refleja el punto de vista de los árbitros, del Editor o de la UNAM.

Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación.

# Índice

- 9** Materiales con cambio de fase: Investigación y aplicaciones  
*Oscar Leonardo Torres Saucedo, Alberto Beltrán Morales*
- 14** Materiales de cambio de fase y su importancia para prácticas sostenibles  
*Karla Paola Acosta-Zamora, Yovani Galindo, José Núñez*
- 19** Propiedades viscoelásticas de alimentos semisólidos, ensayos bajo cizalla oscilatoria, ejemplos en subproductos de aguacate  
*Laura Patricia Martínez-Padilla*
- 24** Un acercamiento a los medios granulares y su lugar en la ciencia y tecnología  
*J. R. Hernández-Juárez, Abel López-Villa, Daniel A. Serrano, Abraham Medina*
- 32** La importancia del acero y su impacto en el medio ambiente: Estrategias e innovaciones para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> en la industria siderúrgica  
*Verónica Delgado-Álvarez, Luis Enrique Jardón-Pérez, Marco A. Ramírez-Argáez*
- 39** Reología dilatacional de proteínas en interfase fluida  
*María Guadalupe Sosa Herrera*

- 43** Estudio del comportamiento reológico de un sistema gelante empleando el principio de superposición tiempo-temperatura-concentración  
*Luis Medina-Torres, Diola-Marina Nuñez Ramirez, Ma. Josefa Bernad-Bernad, Angel Manuel Cabrales-González, Lucila Concepción Nuñez-Bretón, Maricela Zapata-Arroyo, O. Manero*
- 51** Cúmulos metálicos, ¿cómo identificar su estructura más estable?  
*Patricio Limón, Rodolfo Gómez Balderas, Estrella Ramos*
- 59** El uso de la luz solar en la decoloración de aguas residuales, sostenibilidad ambiental  
*Samantha Yadira Pinedo Hernández, José Luis García Rivas, Javier Illescas*
- 65** Heteroestructuras de perovskitas de haluro: Forjando el futuro de los materiales  
*Yoarhy A. Amador Sánchez, Brenda Vargas, Diego Solís Ibarra*
- 69** Importancia de los oleogeles como sustitutos de grasa en el área alimentaria y farmacéutica  
*Lucila Concepción Núñez-Bretón, Bárbara Leslie Cooper-Bribiesca, Luis Medina-Torres, Cristóbal Erik Torres-González, Francisco Erik González-Jiménez, O. Manero*
- 75** Termómetro con función de autocalibración *in situ* en la temperatura de Curie en materiales ferroeléctricos  
*Sebastián Marín Toro, Marc Schalles, Pavo Vrdoljak*

- 85** **Biomateriales para medicina regenerativa I**  
*Ma. Cristina Piña Barba, Israel Alfonso Núñez Tapia, David Eduardo Abad Contreras, Ángela Miscli Rangel García, Daniel Michell Padilla Ramos, Ricardo Mercurio Jiménez Jiménez, Luis Ariel Ruiz García*
- 97** **¿Cómo se comporta mecánicamente una mermelada de nopal?**  
*Jorge Octavio Virues Delgadillo*
- 106** **Material de apoyo a la docencia: Noche de las estrellas 2024: carpa diversa en Morelia y Ciudad Universitaria**  
*Citlali Correa Pérez, Astron Rigel Martínez Rosas*



# Artículos

# Materiales con cambio de fase: Investigación y aplicaciones

**Oscar Leonardo Torres Saucedo, Alberto Beltrán Morales**

Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia;  
Universidad Nacional Autónoma de México; Antigua Carretera a  
Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta C.P.  
58190, Morelia, Michoacán, México  
[leonardo.torres@comunidad.unam.mx](mailto:leonardo.torres@comunidad.unam.mx), [torressdo@gmail.com](mailto:torressdo@gmail.com)

## Resumen

Los materiales con cambio de fase tienen una amplia gama de aplicaciones en diversos campos de la ciencia e ingeniería, algunas de ellas son en las áreas de refrigeración y calefacción, almacenamiento de energía térmica, dispositivos para el control de temperatura, sensores, actuadores, entre otras. En el presente trabajo se exploran los materiales con cambio de fase, algunas de las investigaciones recientes y aplicaciones importantes.

## Palabras clave:

Materiales de cambio de fase, calor latente, ciencia de materiales, ingeniería.

## Introducción

Los materiales con cambio de fase (MCFs) son utilizados en sistemas que requieren absorber o rechazar energía térmica sin tener fluctuaciones significativas en la temperatura, los estados más utilizados son sólido, líquido y gas. Los MCFs más usados son aquellos que operan a temperatura constante en el cambio de fase, ya que pueden recibir o rechazar ca-

lor sin tener variaciones de temperatura. La energía requerida para provocar el cambio de fase en un material es llamada energía latente.

Una de las maneras sencillas para analizar el fenómeno físico es utilizando una sustancia común para todos, el agua. A nivel del mar (expuesta a la atmósfera) hierve a 100 °C, justo antes de comenzar la evaporación se conoce como líquido saturado y justo al terminar la evaporación se conoce como vapor saturado. El agua, cuando se encuentra como líquido saturado, tiene una energía interna por unidad de masa de 418.94 kJ/kg y cuando se encuentra como vapor saturado tiene una energía interna por unidad de masa de 2506.5 kJ/kg [1]. Eso quiere decir que para que el agua cambie de líquido saturado a vapor saturado necesita absorber 2087.56 kJ/kg, esto indica que ¡El vapor saturado es casi 5 veces más energético que el líquido saturado! Esta situación provoca que los materiales con cambio de fase sean una solución y alternativa para problemas en los que se requiera absorber o rechazar una gran cantidad de calor sin tener una variación de temperatura.

En la actualidad, existen diversas aplicaciones que involucran MCFs. A continuación, se mencionan algunas de ellas.

### Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el más utilizado en refrigeradores, sistemas de acondicionamiento de aire y bombas de calor [2]. Un refrigerador y una bomba de calor son en esencia lo mismo, solo que varían sus objetivos. Un refrigerador busca mantener un espacio más frío que el ambiente, mientras que la bomba de calor busca mantener un espacio más caliente que el ambiente. El ciclo de refrigeración por compresión de vapor permite cumplir con ambos objetivos. Se podría decir, que la intención principal del ciclo de refrigeración por compresión de vapor es direccionar la energía térmica y provocar que la transferencia de calor vaya en sentido contrario a la disipación de calor, es decir, direccionar el calor de un cuerpo frío a un cuerpo caliente. El funcionamiento idealizado del ciclo de refrigeración por compresión se compone por cuatro procesos: (1) compresión isentrópica en un compresor, (2) rechazo de calor a presión constante en un condensador, (3) estrangulamiento en un dispositivo de expansión y (4) absorción de calor a presión constante en un evaporador [2]. En la Figura 1 se muestra de forma esquemática el ciclo de refrigeración; las flechas indican la dirección del ciclo.

En el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, el fluido de trabajo es el refrigerante que actúa como MCF, debido a que cambia de líquido a gas y viceversa. El funcionamiento general del ciclo se explica a continuación. (1) El fluido entra al compresor como vapor saturado y se comprime, debido al trabajo que ejerce el compresor sobre el fluido, provocando que aumente su presión y, por la física que inter-

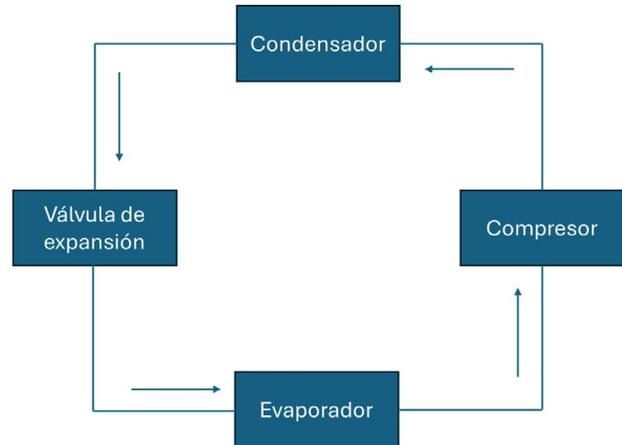


Figura 1. Dispositivos que participan en el ciclo de refrigeración

viene, su temperatura; obteniendo a la salida vapor sobrecalentado a una temperatura mucho mayor a la temperatura del medio que rodea al dispositivo que tiene el fluido. El vapor sobrecalentado es el vapor que está a una temperatura mayor que el vapor saturado, y no está a punto de iniciar el cambio de estado. (2) Posteriormente, el vapor sobrecalentado entra al condensador y este sufre dos procesos, al principio disminuye su temperatura, para posteriormente comenzar el cambio de fase, debido a que el fluido siempre está a una temperatura mayor que el ambiente. El fluido sale del condensador como líquido saturado. (3) A la salida del condensador, el fluido entra a la válvula de expansión. La válvula de expansión provoca que el fluido se acelere, disminuyendo la presión. La temperatura del fluido desciende por debajo de la temperatura del medio que rodea al dispositivo que tiene el fluido. (4) Posteriormente, el fluido entra al evaporador y absorbe el calor del medio circundante, provocando un cambio de fase y saliendo como vapor saturado, reiniciando el ciclo. En la Figura 2 se muestra el diagrama temperatura (T) - entropía (S) del ciclo. La entropía es la magnitud asociada al desorden, sin embargo, para el estudio del ciclo conviene asociar la entropía con la ganancia o pérdida de energía térmica,

esto quiere decir que: si el fluido absorbe calor, la entropía aumenta; y si el fluido rechaza calor, la entropía disminuye. Ya con esta definición, la Figura 2 muestra que en la sección del condensador el fluido pierde energía térmica (disminuye  $S$ ), provocando una disminución de la temperatura y un cambio de fase, y en la sección del evaporador gana energía térmica (aumenta  $S$ ) provocando un cambio de fase de uno menos energético a uno más energético, como se explicó anteriormente.

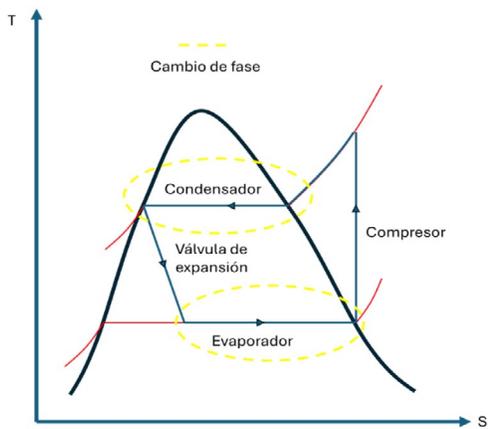


Figura 2. Diagrama T-S del ciclo de refrigeración

Con base en la explicación anterior, el refrigerador ubica su área de mayor interés cercana al evaporador y la bomba de calor ubica su área de mayor interés cercana al condensador. En la Figura 3 se muestra la dirección del flujo de calor en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor según su aplicación.

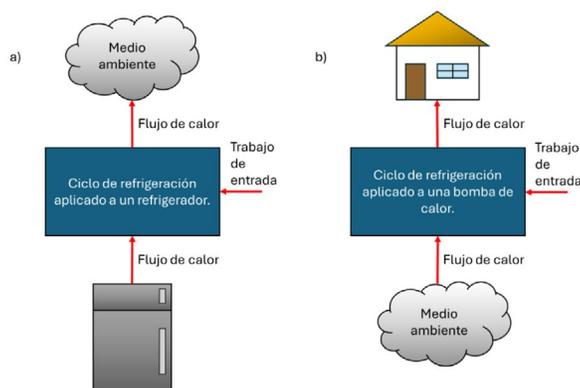


Figura 3. Ubicación del ciclo de refrigeración con respecto a: a) refrigerador y b) bomba de calor

Resulta evidente que la esencia del ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el MCF, ya que si el refrigerante no cambiara de fase, el ciclo no sería posible.

### Almacenamiento de energía térmica y control de temperatura

Otras aplicaciones importantes de los MCFs son el almacenamiento de energía térmica y el control de temperatura en sistemas como edificaciones, microchips y otros. El funcionamiento en esencia es el mismo, el MCF se coloca en contacto con el sistema de interés y absorbe o rechaza energía térmica manteniendo la temperatura constante (o casi constante, dependiendo del MCF).

Para el caso de las edificaciones, algunas de las intenciones principales son reducir el consumo energético y las fluctuaciones de temperatura [3]. La reducción del consumo energético es altamente relevante, debido a que en todo el mundo las edificaciones son responsables de aproximadamente el 40 % del consumo anual de energía y de un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero [3]. Por lo que utilizar materiales con cambio de fase termina siendo una buena alternativa para disminuir el consumo de energía; reducir las fluctuaciones de temperatura es importante para tener un mayor confort y, en casos especiales, mantener ciertos elementos a un ambiente con temperatura controlada (como comida, equipo de cómputo, muestras de laboratorio, etc.).

Un ejemplo claro (de los muchos que hay) del uso de MCFs en edificaciones es el principio de funcionamiento de enfriamiento libre. El funcionamiento, de forma general, consiste en dos modos de operación [4]: la solidificación y la fusión. La solidificación del material con cambio de fase (como se muestra en la Figura 4a) se lleva a cabo idealmente en la noche,

cuando la temperatura ambiente desciende con respecto al día. En este proceso, la unidad de almacenamiento (que contiene al MCF) se expone al aire frío del medio ambiente, provocando que el material se solidifique [4]. Por su parte, la fusión (Figura 4b) sucede cuando el espacio habitable está a una temperatura mayor a la temperatura de fusión del material, absorbiendo la energía térmica del aire de dicho espacio [4]. Cabe remarcar que para la solidificación la unidad de almacenamiento se expone al aire externo cuando está frío, mientras en la fusión solo se expone la unidad de almacenamiento al espacio habitable, ya que de otra manera no sería óptimo el funcionamiento. De la misma manera, solo se tiene un correcto funcionamiento cuando los gradientes de temperatura del ambiente y el espacio habitable varían de una temperatura menor a una temperatura mayor al punto de fusión del MCF.

De la misma manera, el uso de MCFs permiten controlar la temperatura de los microchips. En donde, uno de los factores importantes a considerar, además de los ya evidentes (como la temperatura de cambio de fase, la conductividad térmica, la energía latente y el costo), es que el MCF no dañe al chip. La intención de controlar

la temperatura de los microchips es altamente relevante, ya que, si el microchip llega a temperaturas muy altas con respecto a la temperatura de operación, este comienza a fallar. Además, otra área altamente importante relacionada con los microchips es su reducción de tamaño, teniendo como desventaja, que el flujo de calor por unidad de volumen y área aumente abruptamente, por lo que buscar alternativas como los MCFs es una opción viable.

### Otras aplicaciones

Además de lo ya mencionado anteriormente, los MCF también se utilizan en sensores y actuadores térmicos que responden a cambios de temperatura para realizar funciones específicas. Por ejemplo, se utilizan en termostatos inteligentes para controlar la temperatura ambiente, en válvulas de control de flujo y toma de huellas dactilares [5]. Las aplicaciones de los MCF son muy amplias, por lo que este pequeño artículo no basta para indicar cada una de ellas, sin embargo, se invita al lector a investigar más por su cuenta.

### Investigación relacionada

La dirección de la investigación relacionada con los materiales con cambio de fase se basa en encontrar nueva tecnología, aplicaciones

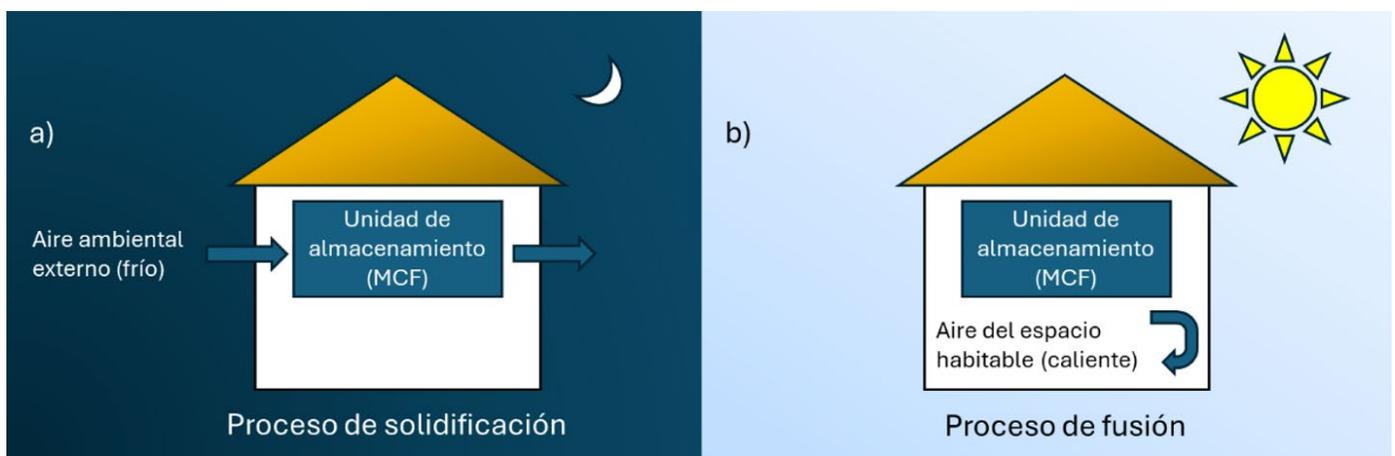


Figura 4. Proceso de solidificación y fusión en el principio de funcionamiento de enfriamiento libre. (a) Proceso de solidificación y (b) Proceso de fusión

prácticas y mejorar procesos de metalurgia [6]; algunas basadas en las aplicaciones mencionadas con anterioridad. Sin embargo, una parte importante de la investigación relacionada con los MCFs, aún no mencionada, es el estudio del comportamiento de MCFs en presencia de variables externas, como la presencia de campos magnéticos externos, corriente eléctrica, entre otras tantas variables posibles. Un caso de estudio particular es el estudio de cambio de fase de metales en presencia de campos magnéticos, caso relevante para procesos de metalurgia y baterías de metal líquido, en las que intervienen muchos fenómenos al mismo tiempo debido a que se debe considerar, además del cambio de fase del material, un campo de estudio conocido como la Magnetohidrodinámica (MHD) que estudia la interacción entre fluidos conductores y campos magnéticos. En el Instituto de Investigación con Materiales de la UNAM se estudia el proceso de cambio de fase de metales con bajo punto de fusión en presencia de campos magnéticos con la intención de aportar nueva información acerca de los MCFs.

## Conclusiones

Debido a la amplia gama de aplicaciones, los MCFs son altamente usados debido a que permiten absorber y rechazar energía térmica teniendo una nula o poca fluctuación de la temperatura (dependiendo del material). Las aplicaciones van desde ciclos de refrigeración por compresión de vapor, hasta sensores y actuadores.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo de los proyectos SECI-HTI CF-2023-I-1373 y UNAM-DGAPA-PAPIIT IN107722.

## Referencias

- [1] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner y M. B. Bailey. *Fundamentals of engineering thermodynamics*, John Wiley & Sons, 2010. [https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=oyt8iW6B4aUC&oi=fnd&pg=PA21&dq=M.+J.+Moran,+H.+N.+Shapiro,+D.+D.+Boettner+y+M.+B.+Bailey,+Fundamentals+of+engineering+thermodynamics,+John+Wiley+%26+Sons,+2010.+&ots=9-G6uCn5MQ&sig=nhiC\\_a3j4ST-LlIVq-nPO9ERcggg&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=oyt8iW6B4aUC&oi=fnd&pg=PA21&dq=M.+J.+Moran,+H.+N.+Shapiro,+D.+D.+Boettner+y+M.+B.+Bailey,+Fundamentals+of+engineering+thermodynamics,+John+Wiley+%26+Sons,+2010.+&ots=9-G6uCn5MQ&sig=nhiC_a3j4ST-LlIVq-nPO9ERcggg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).
- [2] Y. A. Cengel, M. A. Boles y M. Kanoglu. *Thermodynamics: an engineering approach-*, Nueva York: McGraw-hill, 2011.
- [3] A. Waqas y Z. U. Din, "Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—A review" *Renewable and sustainable energy reviews*, volumen 18 (2013), pp. 607-625. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211200576X?casa\\_token=glbCBo8CfUYAAAAA:-gWWcl6hYkdiSpWyRwRbVPxhtN0uXLNE1P8R6bXNTWWb4\\_cfX2Ohtff3f8L89nNcZiGWWGjmimLp](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211200576X?casa_token=glbCBo8CfUYAAAAA:-gWWcl6hYkdiSpWyRwRbVPxhtN0uXLNE1P8R6bXNTWWb4_cfX2Ohtff3f8L89nNcZiGWWGjmimLp).
- [4] L. F. Cabeza, A. Castell y G. Pérez, "Life cycle assessment (LCA) of phase change materials (PCMs) used in buildings". In *Eco-efficient construction and building materials*. Woodhead Publishing, (2014) pp. 287-310. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857097675500133>.
- [5] Y. J. Jin, B. Shin-II Kim, W.-E. Lee, C.-L. Lee, . H. Kim, K.-H. Song, S.-Y. Jang y G. Kwak. "Phase-change hybrids for thermo-responsive sensors and actuators" *NPG Asia Materials*, volumen 6 (2014), n° 10, pp. e137-e137. <https://www.nature.com/articles/am201494>.
- [6] M. Rivero, S. Orozco y A. Beltrán. "Numerical investigation of melting process of gallium under inclination and partial heating" *Journal of Energy Storage*, volumen 59 (2023), p. 106510. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22024999?casa\\_token=u1aNrlzAvBgAAAAA:-naelKeofFslmM7Y1xkLRUcjEJhgn62wVUfoiLyZ-XF3JgQVzL-5TuyRLlrHkxFFeguSUfuifknnHu](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22024999?casa_token=u1aNrlzAvBgAAAAA:-naelKeofFslmM7Y1xkLRUcjEJhgn62wVUfoiLyZ-XF3JgQVzL-5TuyRLlrHkxFFeguSUfuifknnHu)

# Materiales de cambio de fase y su importancia para prácticas sostenibles

Karla Paola Acosta-Zamora<sup>1</sup>, Yovani Galindo<sup>2</sup>, José Núñez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Energías Renovables, UNAM. Privada Xochicalco S/N, C.P. 58190 Temixco, Morelos, México

<sup>2</sup> Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701 Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta C.P. 58190 Morelia, Michoacán, México

[joseng@enesmorelia.unam.mx](mailto:joseng@enesmorelia.unam.mx)

## Resumen

Este trabajo presenta un estudio de la transferencia de calor en un material de cambio de fase. Estos materiales absorben o liberan energía durante su transición de fase, lo que les permite regular la temperatura con precisión y almacenar grandes cantidades de calor. Se explora si estos materiales pueden servir para almacenamiento térmico, considerando un flujo de calor no uniforme. Los materiales con cambio de fase son clave para aumentar la eficiencia energética y la sostenibilidad industrial, al contrarrestar pérdidas energéticas.

## Palabras clave:

Materiales de cambio de fase, radiación, almacenamiento de energía.

## Introducción

En la actualidad, es esencial lograr una alta eficiencia energética en procesos y dispositivos, adoptar prácticas industriales sostenibles y evitar la mayor cantidad de pérdidas energéticas. Los materiales con cambio de fase han surgido como una manera de responder a estos requerimientos. Estos materiales pueden ser aplicables para contrarrestar las intermi-

tencias correspondientes a la energía solar, aprovechar calores residuales que usualmente son imposibles de aprovechar y regular la temperatura de operación de forma precisa en procesos en los que es necesario [1].

¿Cómo es posible que estos materiales tengan tales aplicaciones? Estos materiales son capaces de absorber o liberar energía durante su transición de fase; es decir, cuando cambian de estado líquido a sólido o viceversa. Esta propiedad confiere a los materiales con cambio de fase la capacidad de mantener un control preciso de la temperatura. Además, su habilidad para absorber o liberar grandes cantidades de calor los convierte en medios eficaces para el almacenamiento de energía.

¿Entonces, cómo almacenan calor los materiales con cambio de fase? Existen dos tipos de calor, el calor sensible y el calor latente. El calor sensible es el calor generado o absorbido cuando una sustancia experimenta cambio de temperatura. Un ejemplo de calor sensible es calentar un comal en la estufa, donde se está administrando calor y esta energía se traduce en que el comal aumenta su temperatura. Por otra parte,

el calor latente es la energía liberada o absorbida para que un sistema cambie de estado. A diferencia del calor sensible, en este caso no se percibe un cambio de temperatura del sistema, sino un cambio en las propiedades de este. Un ejemplo es poner a calentar agua, cuando esta comienza a hervir, el agua comienza a evaporarse; la temperatura del agua no cambia.

Los materiales de cambio de fase aprovechan estos dos tipos de calor para almacenar de forma eficiente la transferencia de energía. Usualmente, la energía necesaria para realizar un cambio de fase es mayor a la necesaria para sentir un cambio de temperatura, por lo tanto, esta gran cantidad de energía es utilizada para el almacenamiento térmico de energía [2]. Cuando un material con cambio de fase se encuentra en estado sólido y se le administra calor, este comienza a fundirse hasta alcanzar el estado líquido. Durante este proceso, el calor administrado es utilizado para romper enlaces intermoleculares, pasando a un estado líquido. La energía administrada es almacenada en forma de calor latente, el cual puede ser liberado cuando el ambiente se enfría, así el material con cambio de fase pasará ahora del estado líquido a sólido, liberando el calor administrado anteriormente.

Un ejemplo del uso de estos materiales para almacenar energía se encuentra en los calentadores solares. Estos sistemas capturan el calor solar durante el día para calentar agua, que generalmente se utiliza en la noche o la mañana siguiente. Si las noches son muy frías, el agua calentada por el sol durante el día podría enfriarse. Sin embargo, el uso de un material con cambio de fase podría ayudar a mantener el agua a una temperatura constante por mucho más tiempo, ya que el calor almacenado durante el día retarda el proceso de enfriamiento del agua. Así, estos materiales son una solución para la latencia de la energía solar, calenta-

miento de agua, optimización de sistemas de calefacción o refrigeración, entre otros [3], [4]. Ya se mencionó la importancia y el potencial de los materiales con cambio de fase para el almacenamiento térmico y la eficiencia energética, pero ¿qué necesita un material para utilizarse como medio de almacenamiento de calor latente? Pues bien, hay que tomar en cuenta diversas características como la temperatura de operación, la densidad energética del material, la reactividad, conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica, costo, disponibilidad, toxicidad, entre otras propiedades. El material con cambio de fase adecuado resulta de una valoración entre las características antes mencionadas y el uso de la ciencia para mejorar las propiedades térmicas de estos materiales [5].

En general, dependiendo de su temperatura de operación y el tipo de materiales se pueden clasificar de dos maneras: por su temperatura de operación ya sea baja (hasta 150 °C) o alta (mayor a 150 °C); y por su composición, que pueden ser materiales orgánicos e inorgánicos. Entre los principales materiales con cambios de fase se encuentra el agua, sales, alcoholes, parafinas, azúcares, ceras, ácidos grasos, polímeros y aleaciones metálicas [6]. Una práctica reciente es adicionar nanomateriales como lo son el óxido de titanio, alúmina, cobre, aluminio, nanotubos de carbono, grafito, óxido de zinc, entre otros materiales nanoparticulados a los materiales con cambio de fase orgánicos. Lo anterior crea dispersiones que mejoran las propiedades térmicas de los materiales con cambio de fase [7], [8].

### **Proceso de cambio de fase de un material debido a un flujo de calor no uniforme**

A nivel de laboratorio, una técnica para medir las temperaturas de los cuerpos es la termografía. La termografía es una manera de detectar la

radiación infrarroja emitida por los cuerpos. La radiación infrarroja es emitida en función de la temperatura, un objeto más cálido presentará una mayor radiación que uno frío. La manera de detectar esta radiación es mediante cámaras termográficas, las cuales convierten la radiación infrarroja en una imagen visible. Una cámara termográfica utiliza un sensor especializado, llamado microbolómetro, para captar esta radiación. Adicionalmente, la cámara termográfica utiliza filtros para bloquear la luz visible que podría interferir con la detección infrarroja. Las señales eléctricas captadas por el sensor son procesadas por un circuito electrónico integrado en la cámara. Este circuito amplifica las señales y las convierte en datos digitales. Una vez que los datos digitales están disponibles, se utilizan algoritmos y software específicos para mapear estos datos en una imagen visible. En este proceso se asignan colores a diferentes niveles de radiación infrarroja para crear una representación visual de la distribución de temperaturas en la escena captada por la cámara. La imagen generada se muestra en la pantalla de la cámara, permitiendo al usuario ver y analizar la distribución térmica de los objetos en la escena. La Figura 1a muestra una cámara termográfica capaz de detectar la radiación infrarroja de un cuerpo dado. La cámara viene calibrada de fábrica, tiene un valor de 0.95 para la emisividad y su precisión es de  $\pm 2$  °C. La Figura 1b muestra una prueba con una placa caliente a temperatura constante.

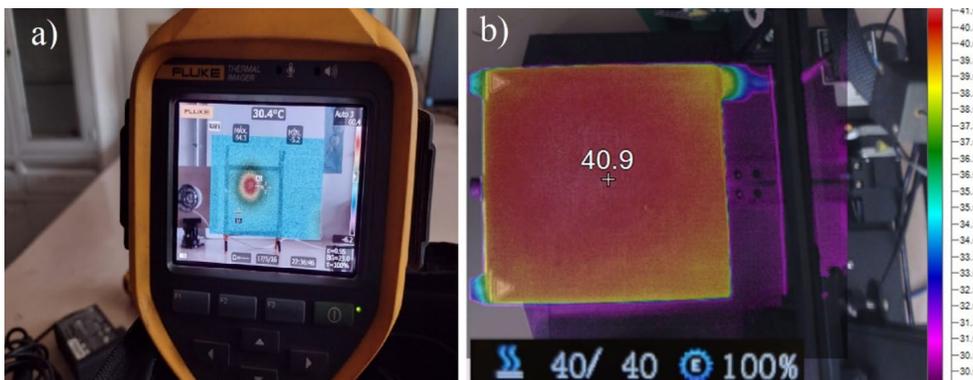


Figura 1. a) Cámara termográfica en operación donde se puede ver el perfil infrarrojo del cuerpo al que la cámara está enfocada mostrando en rojo la región con mayor temperatura y en azul la de menor. b) Calibración con una placa caliente a temperatura constante

Para explorar el efecto de los mecanismos de transferencia de calor en los materiales con cambio de fase se ha diseñado un experimento. El experimento es muy sencillo, se ilustra en la Figura 2 y consiste en una cera parafina confinada dentro de un par de placas de vidrio. La parafina es expuesta al calor producido por la radiación de un foco incandescente y por lo tanto comienza a fundirse de manera localizada. Su temperatura de fusión es de 58-60 °C [9].

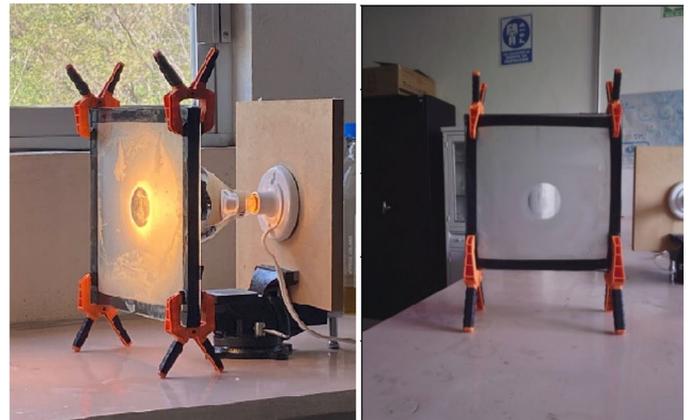


Figura 2. Experimento para estudiar el proceso de cambio de fase debido a la radiación incidente de un foco

Para monitorear el proceso se han tomado termografías como se muestra en la Figura 3. Debido a que la temperatura de fusión (es decir, la temperatura en la que a parafina cambia del estado sólido al líquido) es conocida, utilizando las técnicas de la termografía podemos detectar los cambios de temperatura en un ciclo de fusión-solidificación del material. Adicionalmente, es posible determinar la parte líquida y la parte sólida de este. Mediante es-

tas mediciones, además, podemos inferir qué mecanismo de transferencia de calor influye más en este proceso.

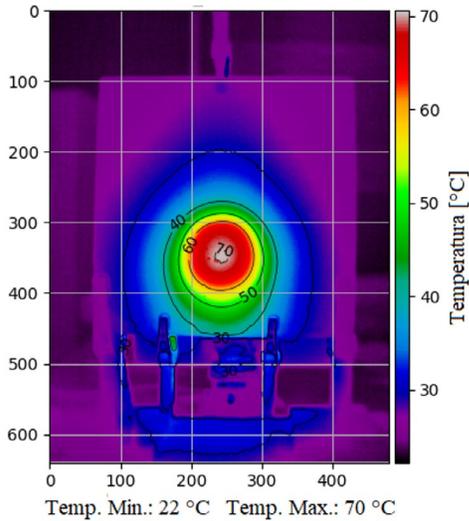


Figura 3. Termografía del cambio de fase de la parafina. La escala del eje x y y representan el número de píxeles de la imagen termográfica. La figura detalla las temperaturas alcanzadas dependiendo de la escala de colores que esta presenta.

Además, para tener una mejor explicación de los procesos de transferencia de calor podemos recurrir a simulaciones numéricas, mediante las cuales es posible observar efectos que a nivel laboratorio son imposibles de observar [10]. En este caso se utilizan herramientas de la dinámica de fluidos computacional. Las simulaciones numéricas permiten monitorear otras variables que difícilmente se pueden medir con un experimento, entre ellas, la tasa de transferencia de calor o las velocidades de flujo en la parte líquida. Esto se ilustra en la Figura 4. Estas simulaciones se realizaron en el software especializado Ansys Fluent basado en un método de volúmenes finitos.

Esto nos permite determinar que la parafina comienza a derretirse y el proceso de fusión comienza siendo dominado por la conducción de calor en el material. Una vez que la fracción líquida es lo suficientemente importante, el movimiento de la fase líquida comienza a ver el

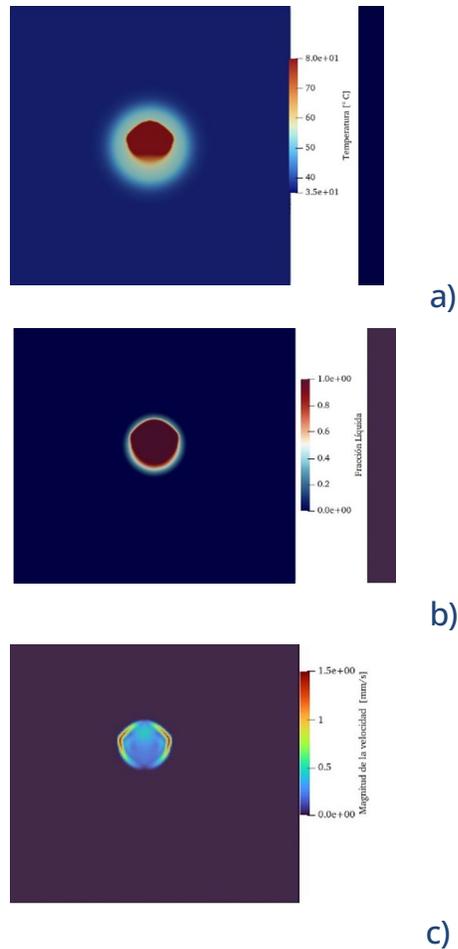


Figura 4. Simulaciones del proceso de fusión de la parafina. a) distribución de la temperatura, en rojo la temperatura es más alta, b) fracción líquida donde la parte roja representa al líquido y c) magnitud de la velocidad donde la zona morada no tiene velocidad y la zona roja es la velocidad más alta

efecto de la convección, esto debido al calor recibido por el foco incandescente. Debido a que este se encuentra localizado en el centro de la celda experimental, una vez fundada la parte del foco, la parte líquida eleva su temperatura y debido a la gravedad comienza a generarse un proceso de convección natural muy similar al que se observa en una olla de agua hirviendo. Las corrientes inferiores elevan su temperatura y tienden a ser más ligeras, lo que hace que el líquido comience a fundir la parte superior de la celda y no la inferior. Sin embargo, llega un momento en que es imposible fundir la parafina que se encuentra en las esquinas de la celda.

## Comentarios finales

En conclusión, la transferencia de calor desempeña un papel fundamental en los materiales con cambio de fase, siendo clave para su eficiente funcionamiento en diversas aplicaciones, desde el almacenamiento de energía hasta la regulación térmica en sistemas industriales y prácticas sostenibles. A través de mecanismos como la conducción, convección y radiación, estos materiales son capaces de absorber o liberar energía durante su proceso de transición de fase, lo que los convierte en herramientas valiosas para optimizar el uso de recursos energéticos y reducir pérdidas.

El diseño y análisis de experimentos, combinados con herramientas como la termografía y simulaciones numéricas, nos permiten comprender mejor los procesos de transferencia de calor en estos materiales, así como identificar cómo influyen los distintos mecanismos en su comportamiento durante los ciclos de fusión y solidificación. Este enfoque integrado nos ayuda a desarrollar y seleccionar materiales con cambio de fase adecuados para cada aplicación específica, considerando factores como temperatura de operación, densidad energética, conductividad térmica y disponibilidad, entre otros.

Para finalizar, la investigación y aplicación de estos materiales contribuyen a mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental, pero también a promover la innovación en el desarrollo de soluciones sostenibles para los desafíos actuales y futuros en el ámbito energético e industrial.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer al proyecto SE-CIHTI-PRONACES 319333.

## Referencias

- [1] H. M. Ali et al., "Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications," *Prog Energy Combust Sci*, vol. 100, no. September 2023, 2024, doi: [10.1016/j.pecs.2023.101109](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101109).
- [2] S. Tiari, A. Hockins, and K. Shank, "Experimental study of a latent heat thermal energy storage system assisted by varying annular fins," *J Energy Storage*, vol. 55, no. PB, p. 105603, 2022, doi: [10.1016/j.est.2022.105603](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105603).
- [3] B. Diaconu, M. Cruceru, and L. Anghelescu, "Phase change materials in space systems. Fundamental applications, materials and special requirements – A review," *Acta Astronaut*, vol. 216, no. July 2023, pp. 163–213, 2023, doi: [10.1016/j.actaastro.2023.12.040](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.12.040).
- [4] K. Du, J. Calautit, Z. Wang, Y. Wu, and H. Liu, "A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges," *Applied Energy*, vol. 220. Elsevier Ltd, pp. 242–273, Jun. 15, 2018. doi: [10.1016/j.apenergy.2018.03.005](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.005).
- [5] R. Naveenkumar et al., Review on phase change materials for solar energy storage applications, vol. 29, no. 7. Springer Berlin Heidelberg, 2022. doi: [10.1007/s11356-021-17152-8](https://doi.org/10.1007/s11356-021-17152-8).
- [6] T. Zhang, D. Huo, C. Wang, and Z. Shi, "Review of the modeling approaches of phase change processes," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 187, Nov. 2023, [7] P. Bose and V. A. Amirham, "A review on thermal conductivity enhancement of paraffinwax as latent heat energy storage material," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65. Elsevier Ltd, pp. 81–100, Nov. 01, 2016. doi: [10.1016/j.rser.2016.06.071](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.071).
- [8] N. I. Ibrahim, F. A. Al-Sulaiman, S. Rahman, B. S. Yilbas, and A. Z. Sahin, "Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74. Elsevier Ltd, pp. 26–50, 2017. doi: [10.1016/j.rser.2017.01.169](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.169).
- [9] M. Thonon, G. Fraisse, L. Zalewski, and M. Pailha, "Towards a better analytical modelling of the thermodynamic behaviour of phase change materials," *J Energy Storage*, vol. 32, p. 101826, Dec. 2020, doi: [10.1016/j.est.2020.101826](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101826).
- [10] J. Núñez, A. Beltrán, M. Rivero, and J. Vega, "Numerical simulation of a polymer melting process using solar energy," *Revista Mexicana de Física*, vol. 1, no. 2, pp. 18–24, 2020.

# Propiedades viscoelásticas de alimentos semisólidos, ensayos bajo cizalla oscilatoria, ejemplos en subproductos de aguacate

**Laura Patricia Martínez-Padilla**

Laboratorio de Propiedades Reológicas y Funcionales en Alimentos  
Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Av. 1 de mayo, S.N., 54740 Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México  
[lpmp@unam.mx](mailto:lpmp@unam.mx)

## Resumen

Las propiedades viscoelásticas de alimentos son importantes para evaluar cambios de formulación o del proceso aplicado, además de ser útiles en la evaluación de la calidad de productos. En ocasiones se recurre a la medida de viscosidad, que no es suficiente para explicar el comportamiento reológico de materiales semisólidos. En este documento se presentan algunos espectros mecánicos de subproductos de aguacate, estableciendo previamente los conceptos requeridos para su comprensión.

## Palabras clave

Viscoelasticidad, alimentos semisólidos, aguacate, cizalla oscilatoria, reología

Un material puede comportarse mecánicamente como un sólido o como un líquido, independientemente de su aspecto físico o su estado de organización molecular (lo cual de-

pende de la escala de tiempo en la que ocurre la deformación). Algunos materiales presentan ambos comportamientos y son denominados materiales viscoelásticos. Muchos alimentos fluidos requieren de un esfuerzo mínimo para fluir, denominado esfuerzo de cedencia que, después de sobrepasarlo, presentan un comportamiento no-newtoniano en condiciones de flujo. El comportamiento observado en condiciones de flujo es un indicio de que el material presenta propiedades viscoelásticas.

Se pueden encontrar en la literatura científica el comportamiento reológico o las propiedades viscoelásticas de alimentos semisólidos derivadas de las curvas determinadas en reómetros, a través de tres ensayos: a) Fluencia-recuperación, se aplica un esfuerzo de cizalla constante durante un tiempo y se mide la deformación de cizalla producida, se elimina el esfuerzo de cizalla y se da seguimiento a la recupera-

ción del material; b) Relajación, se aplica una deformación de cizalla constante en función del tiempo y se mide el esfuerzo de cizalla resultante, o c) Cizalla oscilatoria, se aplica una deformación en forma sinusoidal y se mide el esfuerzo de cizalla correspondiente, también como función sinusoidal, y este último ensayo es el más empleado, dada la facilidad de interpretar los gráficos.

### Ensayos bajo cizalla oscilatoria

Para comprender los gráficos reportados en el ensayo bajo cizalla oscilatoria, es necesario definir las ecuaciones con las variables involucradas [1]. La deformación de cizalla ( $\gamma$ ) aplicada está definida por una función sinusoidal del tiempo ( $t$ ), Ec. 1:

$$\gamma = \gamma_0 \text{sen}(\omega t) \quad (1)$$

donde,  $\gamma_0$  es la amplitud de  $\gamma$ ,  $\omega$  es la frecuencia angular (rad/s). El esfuerzo de cizalla ( $\sigma$ ) resultante está definido también por una función sinusoidal, cuya curva puede estar desfasada con respecto a la de  $\gamma$ , por  $\delta$ , Ec. 2:

$$\sigma = \sigma_0 \text{sen}(\omega t - \delta) \quad (2)$$

donde,  $\sigma_0$  es la amplitud del  $\sigma$ , que no deberá confundirse con el esfuerzo de cedencia que tiene la misma nomenclatura en el tratamiento de fluidos viscosos en condiciones de flujo bajo cizalla [2].

En el ensayo bajo cizalla oscilatoria de pequeña amplitud, donde se aplica  $\gamma$  a  $\omega$  constante, en un material fluido, la curva de respuesta,  $\sigma$ , se desfasará  $90^\circ$  ( $\delta = \pi/2$ ), mientras que, en un material sólido, las curvas de  $\sigma$  estarán en fase ( $0^\circ$ ). Como se observa en la Figura 1, la respuesta del  $\sigma$  de un material fluido (línea punteada roja) estará desfasado  $\pi/2$  o  $90^\circ$ , donde el valle de la curva de  $\gamma$  (línea continua)

coincide con la cresta de  $\sigma$  (línea punteada roja). En el caso de un material sólido, el  $\sigma$  obtenido como variable de respuesta (línea azul punteada) estará en fase con la  $\gamma$  aplicada (línea continua), donde las crestas de las curvas coinciden. Un material viscoelástico presentará un desfase entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .

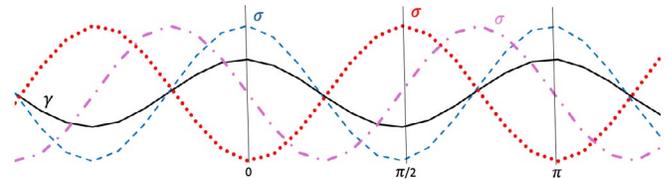


Figura 1. Ejemplo de la deformación de cizalla aplicada,  $\gamma$ , ( — ) y la respuesta del esfuerzo de cizalla,  $\sigma$ , en un material sólido ( - - - ), un fluido ( ····· ) y un material viscoelástico ( — · — )

Por facilidad, se han definido dos módulos que relacionan las amplitudes,  $\gamma_0$ ,  $\sigma_0$ , de las curvas sinusoidales con el desplazamiento,  $\delta$ , módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y módulo de pérdida ( $G''$ ), Ec. 3 y Ec. 4, respectivamente.

$$G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad (3)$$

$$G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \text{sen} \delta \quad (4)$$

Además, el módulo complejo  $G^* = \sqrt{[(G')^2 + (G'')^2]}$  involucra ambos módulos.  $G'$  es una medida de la energía almacenada y recuperada por el material en un ciclo, es un indicador del componente elástico del material, mientras que  $G''$  es una medida de la energía disipada como calor por el material en un ciclo y es un indicador del componente viscoso del material. Los módulos se obtienen al considerar que, en un material viscoelástico, el  $\sigma$  está relacionado con la  $\gamma$  del sólido (sólido de Hooke) y el flujo del material (fluido de Newton) a través de la Ec. 5.

$$\sigma = G' \gamma + \eta' \dot{\gamma} = G' \gamma + (G''/\omega) \dot{\gamma} \quad (5)$$

$\eta'$  es la viscosidad dinámica,  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de deformación de cizalla, o derivada de  $\gamma$  en función del tiempo, Ec. 6.

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d[\gamma_0 \text{sen}(\omega t)]}{dt} = \gamma_0 \cos(\omega t) \quad (6)$$

Si en un material predomina el comportamiento fluido, los módulos suelen expresarse en términos de la viscosidad dinámica,  $\eta'$ , Ec. 7, y de la componente de la viscosidad compleja fuera de fase,  $\eta''$ , Ec. 8, definidas por  $G''$  y  $G'$ , respectivamente. Aunque, lo más común es encontrar resultados en función de la viscosidad compleja,  $|\eta^*|$ , Ec. 9.

$$\eta' = G''/\omega \quad (7)$$

$$\eta'' = G'/\omega \quad (8)$$

$$|\eta^*| = G^*/\omega = \sqrt{(\eta')^2 + (\eta'')^2} \quad (9)$$

Se cuenta también con otro parámetro que describe el comportamiento viscoelástico de los materiales, la tangente del ángulo de desfaseamiento o  $\tan \delta$ , que puede variar desde 0 hasta  $\infty$ , Ec. 10. Si el valor es inferior a la unidad, indica que el material se comporta predominantemente como sólido, y si el valor es mayor a la unidad el comportamiento predominante es el de un fluido.

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (10)$$

Es importante mencionar que en las pruebas oscilatorias de pequeña amplitud se emplean deformaciones donde los materiales no modifican significativamente su macroestructura. Por lo general, deformaciones de cizalla menores al 5 % (con el fin de mantener una respuesta proporcional o lineal, entre la  $\gamma$  aplicada y el  $\sigma$  medido). Cuando las pruebas se realizan bajo estas condiciones se indica que están en condiciones de viscoelasticidad lineal. Bajo estas, la  $\gamma$  es función solamente del tiempo y no de

la magnitud de  $\gamma$ . Las pruebas oscilatorias de pequeña amplitud también pueden realizarse en reómetros, donde se puede aplicar el  $\sigma$  de manera sinusoidal y se mide la  $\gamma$  resultante. De igual manera, se aplican  $\sigma$  pequeños que no sobrepasen el 5 % de  $\gamma$  y las curvas de respuesta serán similares a las presentadas en la Figura 1.

El ensayo bajo cizalla oscilatoria se realiza en dos etapas, la primera donde se localiza la zona de viscoelasticidad lineal y la segunda donde se obtiene el espectro mecánico. En la primera etapa se realiza un barrido de  $\gamma$  manteniendo la  $\omega$  constante, y se traza el gráfico con los módulos en función de  $\gamma$ , por lo general, expresada en porcentaje. En algunos casos, esta figura se omite en los artículos.

En la zona de viscoelasticidad lineal (ZVE), ambos módulos no dependen de  $\gamma$  hasta cierta deformación, por lo que se considera límite de la ZVE. Después de ese límite, por lo general, los módulos disminuirán como consecuencia de la ruptura de enlaces de hidrógeno en la macroestructura. En la segunda etapa se realiza un barrido de frecuencia a  $\gamma$  constante, y se trazan los gráficos de  $G'$  y  $G''$  en función de la frecuencia. A este gráfico se le conoce como espectro mecánico y es donde se puede inferir si el comportamiento es predominantemente sólido, como en los geles; predominantemente fluido, como en las disoluciones diluidas de polímeros, o intermedio como en las concentradas de polisacáridos no gelificantes.

### Propiedades reológicas de subproductos de aguacate

En la Figura 2 se presenta el espectro mecánico característico de un puré de aguacate, obtenido con un dispositivo de cilindros concéntricos (CC27) de acero inoxidable en un reómetro MCR301 (Anton Paar, Austria), manteniendo

una y constante de 0.05 % (ZVL). El puré de aguacate se obtiene después de un molido suave de la pulpa del fruto de aguacate. Se puede observar el comportamiento sólido predominante, ya que  $G'$  es superior a  $G''$ , en todo el intervalo de frecuencia estudiado, además de que no se observa dependencia de  $G'$  con  $\omega$ .

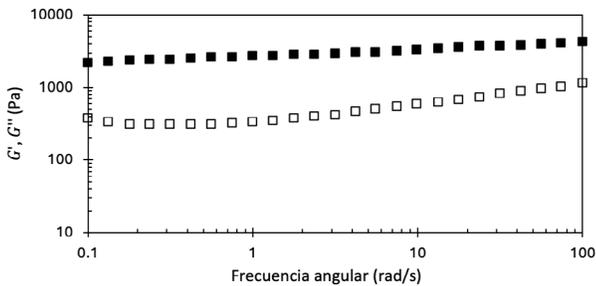


Figura 2. Espectro mecánico de puré de aguacate, 73.5 % humedad, 25 °C,  $G'$  símbolos llenos,  $G''$ , símbolos vacíos

Los módulos evaluados pueden usarse para cuantificar el efecto de algún cambio en el material, como la adición de agua y el malaxado [3]. En la Figura 3 se presentan los módulos evaluados a una frecuencia angular constante (1 rad/s), en función de la humedad del puré malaxado.

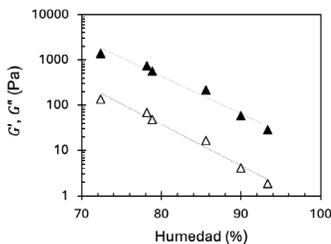


Figura 3.  $G'$  y  $G''$  de puré de aguacate, evaluados a 1 rad/s, sin mezclar y mezclada con agua purificada en una malaxadora (1 hora) en función de la humedad, 25 °C,  $G'$  símbolos llenos,  $G''$ , símbolos vacíos

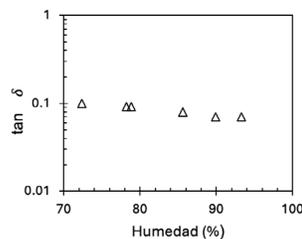


Figura 4.  $\tan \delta$  de pulpa de aguacate, evaluada a 1 rad/s, sin mezclar y mezclada con agua purificada en una malaxadora (1 hora) en función de la humedad, 25 °C

Como es de esperarse, el valor de los módulos disminuye conforme aumenta el contenido de humedad de las muestras. Sin embargo, el valor de la  $\tan \delta$  es cercana a 0.1, a pesar de

los altos contenidos de humedad alcanzados (Figura 4), implicando que el predominio del comportamiento sólido no cambia, a pesar del gran contenido de humedad.

En la Figura 5, se presenta el espectro mecánico de un producto tipo emulsión aceite en agua, que contiene pulpa de aguacate, incluye tres réplicas del ensayo, confirmando que el ensayo es repetible. La caracterización reológica se realizó en un dispositivo de placas paralelas con una separación de 1 mm, la placa que oscila está dentada y es de acero inoxidable. Se utilizó un reómetro MCR301 (Anton Paar, Austria), manteniendo una y constante de 0.05 % (ZVL). Se observan espectros parecidos a los del puré de aguacate, donde el predominio del comportamiento sólido se mantiene. En este caso, los valores de los módulos son menores a los que presentó el puré de aguacate y se observa una ligera dependencia de los módulos con la frecuencia.

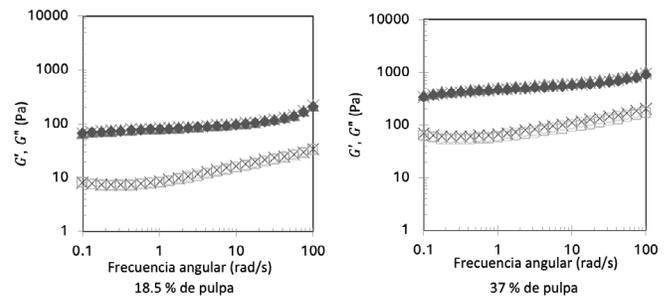


Figura 5. Espectros mecánicos de una emulsión conteniendo pulpa de aguacate 25 °C,  $G'$  símbolos llenos,  $G''$ , símbolos vacíos

Finalmente, en la Figura 6 se presenta la viscosidad compleja de las emulsiones aceite en agua con pulpa de aguacate en dos proporciones, con la finalidad de comparar el comportamiento viscoelástico en términos de viscosidad. Se confirma la similitud de la dependencia de  $|\eta^*|$  con  $\omega$ , al compararla con las curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla, que se obtienen en

condiciones de flujo para fluidos no-newtonianos, y que la emulsión con mayor proporción de pulpa presenta la mayor  $|\eta^*|$ .

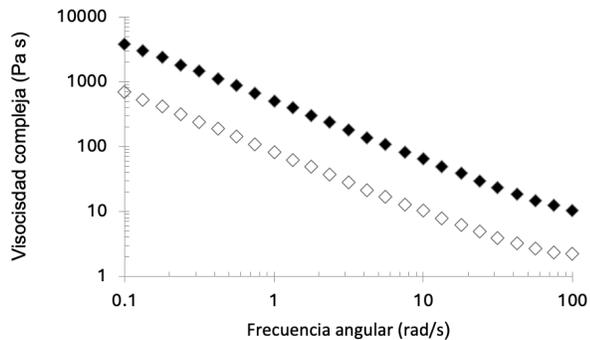


Figura 6. Viscosidad compleja, en función de una emulsión conteniendo pulpa de aguacate 25 °C, 37 % pulpa, símbolos llenos, 17.5 % pulpa, símbolos vacíos

## Conclusión

El ensayo bajo cizalla oscilatoria es un método que permite caracterizar las propiedades viscoelásticas de alimentos semisólidos con gráficos de fácil interpretación. La pulpa de aguacate es un material sólido que, molida en forma de puré, malaxada en agua o incorporada en un sistema disperso tipo emulsión, presenta propiedades viscoelásticas, predominando el comportamiento sólido al fluido en todos los casos mencionados.

## Referencias

- [1] Steffe, J.F. (1996). Rheological Methods in Food Process Engineering. 2nd ed. East Lansing, MI: Freeman Press.
- [2] Martínez-Padilla, L.P. (2022). Tratamiento de datos de alimentos fluidos para la determinación experimental de viscosidad. Processing of fluid food data for the experimental determination of viscosity. Educación Química, 33(3), 3.81406.
- [3] Martínez-Padilla, L.P., Franke, L., Juliano, P. (2017). Characterisation of the viscoelastic properties of avocado puree for process design applications. Biosystems Engineering, 161:62-69.

# Un acercamiento a los medios granulares y su lugar en la ciencia y tecnología

J. R. Hernández-Juárez<sup>1</sup>, Abel López-Villa<sup>1</sup>, Daniel A. Serrano<sup>2</sup>, Abraham Medina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME Unidad Azcapotzalco, Av. de las granjas 682, Col. Sta. Catarina, Azcapotzalco 02250, Ciudad de México

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Querétaro, Av. Tecnológico s/n, Centro, 76000 Santiago de Querétaro  
[jhernandezj@ipn.mx](mailto:jhernandezj@ipn.mx)

## Resumen

En este artículo se presenta una breve introducción del impacto que tienen los medios granulares en el desarrollo de la ciencia, la tecnología y la vida cotidiana, dando un primer acercamiento a los conceptos básicos y el comportamiento de los mismos. Se presenta un breve recorrido de los medios granulares en la historia de la ciencia reciente (y no tan reciente) mencionando que están presentes en diferentes disciplinas, tales como la arqueología y la astronomía. Finalmente, se mencionan algunas aplicaciones de los medios granulares que van más allá de la industria agrícola, farmacéutica y de la construcción. Aplicaciones de relevancia como la eficiencia energética o el transporte no invasivo por medio de levitadores ultrasónicos y su aplicación al entendimiento de fenómenos naturales.

## Palabras clave

Medio granular, polidisperso, monodisperso, esfericidad, tamaño de grano, granulometría, ángulo de reposo, batería de arena, fuerzas de tracción.

## Introducción

La vida cotidiana se encuentra permeada por la presencia de medios granulares. Por ejemplo, en el contenido de las cajas de cereal que se disfruta en compañía de un tazón de leche, en las vacaciones al visitar la playa y caminar con los pies descalzos sintiendo la textura de la arena al contacto con la planta de los pies o al viajar en el tren subterráneo, donde se observa que los espacios entre la vía y los durmientes se encuentran rellenos de balasto, que son piedras de un tamaño casi uniforme y cuyo objetivo es dar estabilidad a la vía. Estas experiencias comparten un protagonista común, el medio granular.

Para los científicos y tecnólogos, los medios granulares presentan un reto y una fascinación por sus características físicas, lo cual ha llevado a desarrollar aplicaciones y al entendimiento de fenómenos complejos que permiten comprender la naturaleza de los mismos. Este breve artículo es una primera aproximación a los medios granulares y su lugar en la ciencia y tecnología.



Figura 1. Balasto sobre las vías en una estación del tren subterráneo en Ciudad de México

## ¿Qué es un medio granular y cómo se origina?

Un medio granular se define como una colección de partículas esféricas del mismo tamaño dentro de un rango porcentual establecido. Sin embargo, en la naturaleza, los medios granulares están formados por partículas de distintos tamaños y formas que se clasifican en medios granulares monodispersos y polidispersos. Un medio granular polidisperso está formado por partículas de diferentes formas y tamaños, mientras que un medio monodisperso está formado por granos de un solo tamaño y forma [1, 2].

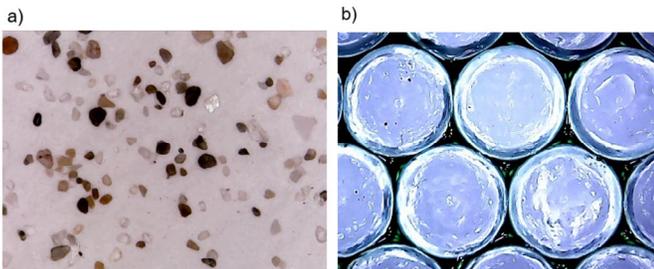


Figura 2. a) La arena de playa es un medio polidisperso bajo el microscopio, b) esferas de vidrio de diámetro de 5 mm, un ejemplo de medio monodisperso

Los medios granulares se originan por mecanismos físicos, químicos y biológicos. La fractura de rocas o la colisión de granos, que son transportados por la acción del viento y que impactan contra otras superficies rocosas que dan origen a ciertos tipos de arenas son ejemplo de un mecanismo físico. Un ejemplo

de mecanismo biológico es la acción de las raíces de plantas y árboles en el suelo y que, por el crecimiento de las mismas, fractura la composición del suelo, dando origen a un medio granulado. Por otro lado, el mecanismo químico hace referencia a sustancias minerales que son capaces de fracturarse y disolverse dando lugar a algún tipo de arcilla, como silicatos de aluminio, hierro, calcio o magnesio (que se encuentran en rocas llamadas micas).

En diversas actividades humanas, diferentes materiales son considerados como un medio granular. Por ejemplo, los granos y semillas en la agricultura, las píldoras en la industria farmacéutica o materiales de construcción como la grava. Se estima que el 80 % de la industria mundial utiliza medios granulares, lo que conlleva desafíos significativos en su manejo. El comportamiento preciso de los medios granulares sigue siendo desconocido, ya que existen múltiples factores que influyen en el comportamiento de los mismos, como el tamaño de los granos, su forma y las condiciones de almacenamiento [2, 3, 4, 5].

## Los medios granulares en la historia de la ciencia

El estudio formal de los medios granulares comenzó con la investigación de los fundamentos de la mecánica del suelo, realizada por el ingeniero francés Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806). Le siguieron aportaciones realizadas por Faraday (1791-1867) y Chladni (1756-1827) sobre el estudio de vibraciones en granos, la distribución de presiones en un silo lleno de arena por parte de Hagen (1793-1884), el flujo en medios porosos realizado por Darcy (1803-1858), el estudio de la dilatancia de Reynolds (1842-1912), entre otros de gran relevancia que han contribuido al entendimiento de los fenómenos granulares y sus aplicaciones [2, 3, 6]. Anterior a estos trabajos, civilizaciones

antiguas realizaban aplicaciones en la construcción con medios granulares. Por ejemplo, la civilización egipcia hacía uso de un contenedor de arena enorme (silo), en el cual (sobre la superficie) se colocaba un obelisco en posición horizontal. Mediante una técnica de vaciado del contenedor, el obelisco cambiaba gradualmente su posición hasta ocupar el espacio dejado por la arena, cambiando su ángulo con respecto a la base del contenedor hasta alcanzar una posición vertical. Esta era la técnica para erigir obeliscos en el antiguo Egipto [2, 7, 8].

Otra anécdota histórica que involucra medios granulares, la encontramos en los viajes de Marco Polo, quien describió la presencia de fenómenos acústicos a su paso por el desierto de Gobi: "*las dunas que cantan en ocasiones permean el aire con los sonidos de una variedad de instrumentos musicales y también con el sonido de tambores y el estruendo de armas de batalla*". Estas experiencias sensoriales eran explicadas por presencias sobrenaturales, dando origen a muchos mitos y leyendas. Más recientemente, el ingeniero inglés Ralph Bagnold (1896-1990) realizó investigaciones de las arenas del desierto que sentaron los fundamentos del mecanismo de transporte de la arena por acción del viento. Su célebre libro, *The physics of blown sand and desert dunes*, da cuenta de los fenómenos acústicos en la arena del desierto, que también fueron objeto de su estudio. Hoy se sabe que los fenómenos acústicos en los medios granulares son algo común y al mismo tiempo difíciles de comprender. El sonido en un medio granular se produce por diversos mecanismos físicos y es inducido por las complicadas interacciones entre las partículas que constituyen el medio granular, la temperatura, la humedad, el tamaño de grano, la aceleración de la gravedad, etc. Esto ha ocasionado que el estudio de la acústica en medios granulares sea prácticamente una nueva disciplina [2, 9, 10].

A finales del siglo XVI, el corsario Walter Raleigh (1552-1618) le plantea a Thomas Harriot (1560-1621) el problema de la forma más óptima para apilar balas de cañón sobre la cubierta de un barco. Harriot, a su vez, le comunicó el problema a Johannes Kepler (1571-1630), quien concluyó que un amontonamiento piramidal sería la forma óptima de apilamiento. A esta conclusión se le conoce como la conjetura de Kepler. La demostración matemática de la conjetura se logró hasta 1998 y su publicación se realizó recientemente en 2005 [11, 12].

Hasta 1857 se aceptaba la hipótesis de que los anillos de Saturno eran de naturaleza líquida y en menor medida sólida. En 1856, la Universidad de Cambridge en Inglaterra eligió como problema el "movimiento de los anillos de Saturno" para el premio Adams. Fue Clerk Maxwell (1831-1879), en ocasión de esta convocatoria, quien presentó la propuesta que resultó ganadora. La propuesta establecía que los anillos debían estar constituidos por partículas separadas entre sí, que podrían ser sólidas o líquidas, pero que tenían que ser partículas independientes. La confirmación de su propuesta llegó en 1895, cuando el astrónomo James Keeler (1857-1900) corroboró que los anillos son fragmentos materiales sólidos semejantes a los meteoritos, un medio granular [13, 14].

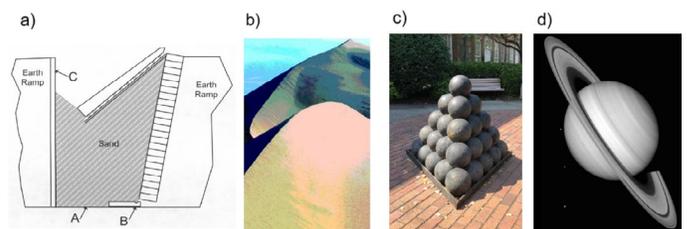


Figura 3. a) Colocación de un obelisco en el antiguo Egipto [7], b) duna en Kelso que produce sonido al fluir material granular sobre su pendiente [15], c) Apilamiento de balas de cañón en el fuerte Monroe en Virginia EU [16], d) Anillos de Saturno. Imagen tomada por la misión Voyager 2 [17]

La lista de contribuciones en el estudio de medios granulares es larga y vasta, para constatarlo, solo hace falta acceder al gran número de publicaciones especializadas que se dan a conocer periódicamente y que van desde trabajos experimentales hasta trabajos puramente teóricos, que tienen por objetivo obtener aplicaciones y modelos matemáticos que buscan describir la naturaleza de los medios granulares.

### El comportamiento de un medio granular

Los medios granulares pueden comportarse como un sólido, un líquido o un gas. Cuando un material granular se encuentra en reposo o almacenado en un contenedor, sin fuerzas externas que lo perturben, el material se trata como un sólido. Este comportamiento se encuentra en las cajas de cereal en reposo, el almacenamiento estático de granos en un silo, entre otros muchos ejemplos en donde el medio granular se dice que no se mueve o no fluye. En la naturaleza, este comportamiento sólido se observa en los montículos, como las dunas del desierto, en algunos cerros, montañas y volcanes.

Los medios granulares también se comportan como líquidos. Algunos desastres naturales están relacionados con este comportamiento, por ejemplo, los deslizamientos de suelo en cerros y montañas (que se conocen como avalanchas). Otros ejemplos son los relojes de arena o la descarga de un medio granular a través del orificio de salida de un silo.

Asimismo, cuando un medio granular se somete a una fuerte agitación se comporta como un gas. Y el estudio se hace más complejo cuando en un mismo fenómeno se presentan los tres comportamientos. Esto demuestra la complejidad del estudio de los medios granulares y al

desafío al que se enfrentan los científicos en la búsqueda de aplicaciones de estos materiales y al entendimiento de la física de los mismos [2, 3, 4, 5, 18].

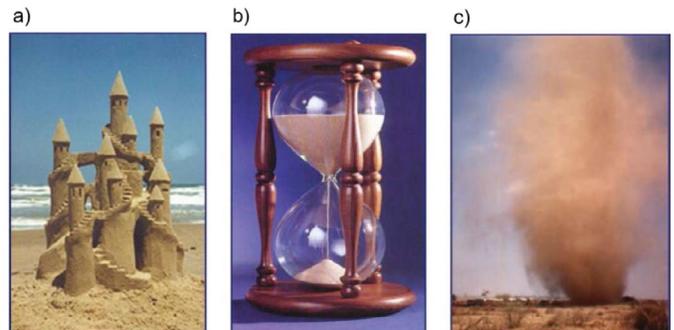


Figura 4. Un medio granular puede comportarse como sólido, líquido o gas [18]: a) castillo de arena, b) reloj de arena, c) un remolino

### Forma de partícula, granulometría y ángulo de reposo

En el estudio de fenómenos y búsqueda de aplicaciones de medios granulares, es de gran importancia definir la forma de partícula por su grado de esfericidad. Si un grano es completamente esférico se establece que tiene un valor de 1, mientras que una partícula con forma de cubo tendrá un valor de 0.81. Para la arena de playa es de 0.86, para el trigo es de 0.85 y, en general, para sólidos triturados su valor ronda entre 0.5 a 0.7. El grado de esfericidad define la clasificación geométrica de partículas y granos de un medio granular. Por ejemplo, el arroz tiene forma de esferoides prolatos, las lentejas de esferoides oblatos, mientras que la sal y la azúcar tienen formas cúbicas. La esfericidad es relevante porque es responsable de modificar la distribución de esfuerzos de los medios granulares en reposo [19, 20].

También es relevante conocer el diámetro promedio de partícula aplicando métodos de granulometría, que es la actividad de medir la forma y la distribución de tamaño de una muestra de un medio granular polidisperso.

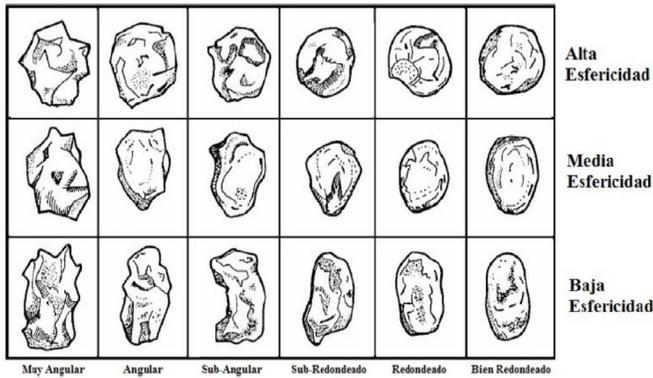


Figura 5. Clasificación de las formas de grano [19, 20]

Esto debido a que en la naturaleza un medio granular es anisométrico, lo que significa que posee diferentes formas. El método de granulometría tradicional para obtener partículas de un tamaño y formas semejantes es hacer pasar las partículas por una serie de mallas, conocidas como tamices de distintos anchos de entramado (semejante a como se realizan algunos procesos con coladores de cocina) que actúen como filtros de los granos, formando así una torre de tamices. Si aplicando un método de granulometría se obtiene un diámetro promedio igual o mayor a  $100\ \mu\text{m}$ , se define que es un medio granular. Por debajo de ese diámetro, las partículas presentan comportamientos más complejos, donde la física del medio granular ya no es consistente.

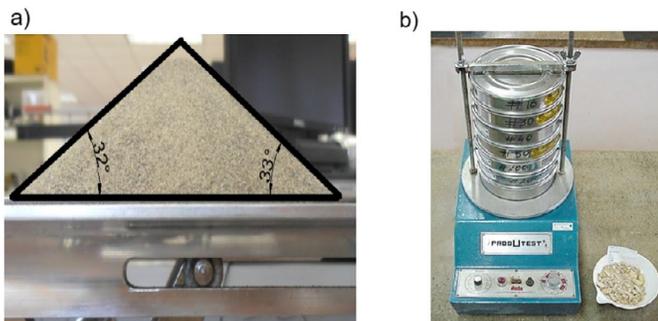


Figura 6. a) Muestra experimental del ángulo de reposo de arena de playa, b) Torre de tamices sobre una máquina de ensayo

El ángulo de reposo es una propiedad única de cada material granular y puede ser afectado por factores como la forma y tamaño del grano, y es un indicador de la fluidez del mate-

rial. La determinación de este ángulo ayuda a mantener la calidad de los granos, asumiendo un menor riesgo de impacto cuando se realiza una descarga de los mismos y es de gran importancia en la construcción de estructuras para su almacenamiento. Mientras menor sea el valor del ángulo de reposo, menor será el riesgo de impacto, permitiendo un adecuado manejo del medio granular

El ángulo de reposo se puede encontrar en la cocina, cuando se prepara algún alimento que involucre semillas, como las lentejas, que suelen vaciarse sobre una superficie generalmente plana formando un montículo piramidal o una estructura cónica. Experimentalmente, resulta sencillo calcular este parámetro mediante técnicas de vaciado y toma de imagen, que permite medir el ángulo formando entre alguna de las aristas del montículo piramidal y la superficie de reposo [2, 3, 19, 21, 22, 23].

## Aplicaciones

Los medios granulares son objeto de estudio en diferentes disciplinas del conocimiento, que van desde la geología hasta la astronomía, y con múltiples aplicaciones en áreas como el manejo de alimentos (granos y semillas), la industria farmacéutica y la industria de materiales de construcción. El estudio en estos campos representa el paradigma en la investigación de los medios granulares. Sin embargo, en disciplinas que involucran el manejo de sustancias radiactivas, desarrollo de nuevas tecnologías para energías renovables, la robótica o el entendimiento del mecanismo de los tornados y los daños que ocasionan, han sido motores que han impulsado la búsqueda de nuevas aplicaciones implementando medios granulares.

Uno de los ejemplos más revolucionarios es la batería de arena desarrollada en Finlandia. La propuesta busca ser una solución al proble-

ma de las energías renovables, como la solar y eólica que son afectadas por la acción del clima. Actualmente, las energías verdes aún no logran asegurar un suministro continuo y estable de energía durante un periodo largo de tiempo. Esta inestabilidad resulta en la necesidad de combinar recursos (como petróleo, gas y carbón) para compensar la red eléctrica. Una solución planteada es el almacenamiento de energía en baterías, la tecnología más accesible son las baterías de litio, que tienen limitaciones como la potencia que pueden suministrar, sin tomar en consideración que la extracción y reciclaje del litio es costoso y con impacto directo sobre el medio ambiente.

Ante este reto surge la batería de arena con un principio de funcionamiento sencillo. En un silo se almacenan 100 toneladas de un tipo de arena utilizada para la construcción que es calentada hasta 500 °C mediante otras fuentes de energías renovables. La batería tiene la capacidad para almacenar calor durante varias semanas. Así que cuando es requerido se libera aire caliente de la batería, que es utilizado para calentar el agua de la red de distribución urbana. El objetivo principal es que este tipo de batería reduzca el costo de la energía y es probable que en un futuro estos dispositivos sean parte de la vida diaria, ya que se están realizando numerosas investigaciones alrededor del mundo.

Otro ejemplo de estudio y aplicación que se está realizando en la dirección de la eficiencia de la energía es la mejora de calentadores solares de agua mediante materiales granulares. Recientemente, un equipo multidisciplinario del IPN ha optimizado el sistema termosifónico de calentamiento de agua solar mediante tubos de vidrio, implementando un medio granular consolidado (que mediante un proceso se ha solidificado), que al igual que la batería

conserva el calor durante un periodo de tiempo prolongado y reduce su dependencia del gas [24-28].

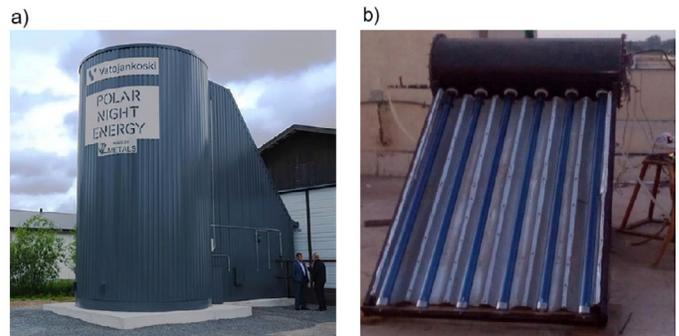


Figura 7. a) Batería de arena en Finlandia, b) Prototipo de calentador solar de un sistema híbrido de tubos de vacío modificados con medio granular

Otras aplicaciones las encontramos en la robótica y la acústica, donde se trabaja con partículas granulares que se hacen levitar (flotar) aplicando energía de ultrasonido. El tamaño de las partículas es equiparable a la longitud de onda generada por los transductores de ultrasonido y existe un gran interés en conocer cuál es la influencia del tamaño de partícula sobre las fuerzas de radiación acústica generadas por los levitadores. Esta técnica busca aplicaciones para la manipulación sin contacto de medios granulares y, al ser una técnica no invasiva, sus aplicaciones se dirigen principalmente al área de ciencias biológicas y medicina [29, 30].

Los materiales granulares no cohesivos (que no se adhieren) poseen propiedades consideradas inusuales. Nota de esta peculiaridad es el trabajo de Janssen de 1895, en el que se explica que debido a la fricción entre los granos y las paredes de un contenedor de sección transversal constante (por ejemplo, un cilindro), el fondo del contenedor no experimentará toda la fuerza ejercida por el peso de los granos almacenados por debajo de una altura crítica, contrario a lo que sucede con los líquidos. Este efecto ha permitido desarrollar las expresiones para entender las fuerzas de tracción gene-

radas debido a la interacción de una varilla cilíndrica colocada concéntricamente en un silo de geometría cilíndrica relleno hasta cierta altura con un medio granular no cohesivo. Este experimento que parece ser sencillo conlleva a una dificultad para comprender la física detrás del mismo. Sucede que al tratar de remover la varilla del contenedor, resulta muy difícil de separarla del medio granular, debido a las fuerzas de tracción generadas y que incluso al aplicar mayor fuerza para removerla, la varilla se vuelve más renuente a salir. Este experimento ejemplifica perfectamente el mito de la espada en la piedra y no es sorpresa que se utilice esta teoría para explicar el complejo movimiento de los árboles durante una tormenta o que se aplique para el diseño de maquinaria para la extracción de árboles en la producción de madera. [31, 32, 33, 34].

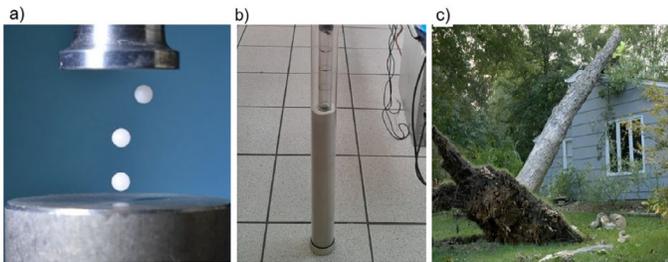


Figura 8. a) Una partícula granular en un levitador acústico [30], b) dispositivo para experimentos de tracción, c) árbol derribado durante fuertes ráfagas de viento

## Conclusiones

El campo de aplicación de los medios granulares es amplio y su estudio mediante modelos matemáticos es complejo, sin embargo, nos encontramos en una época de avances diarios en todas las disciplinas y por una carrera urgente en la optimización de las fuentes de energía. Con seguridad, en los años venideros los medios granulares seguirán ocupando un lugar significativo en el avance de la ciencia y la tecnología, y día a día la sociedad será testigo de esos avances que permearán la vida cotidiana y la no tan cotidiana.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, en especial al Laboratorio de Termodinámicos de la Sección de Estudio de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco.

## Referencias

- [1] E. C. P. Breard, J. Dufek, L. Fullard, A. Carrara. "The basal friction coefficient of granular flows with and without excess pore pressure: Implications for pyroclastic density currents, water-rich debris flows, and rock and submarine avalanches". *JGR Solid Earth*, Vol. (125), 2020, 22 pp.
- [2] B. Andreotti, Y. Forterre, O. Pouliquen, *Granular media: Between fluid and solid*, Cambridge university press, UK, 2013.
- [3] J. Duran, *Sands, powders, and grains*, Springer-Verlag, New York, 1999.
- [4] H. Hinrichsen, D. Wolf, *The physics of granular media*, Wiley, 2004.
- [5] D. Schulze, *Powders and bulk solids*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [6] K. Wiegardt, "Experiments in granular flow". *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 7 (1975), 89-114.
- [7] W. J. Spry, "The transport and erection of large Egyptian obelisks or engelbach revisited". *Journal of the Washington Academy of Sciences*, Vol. 95 (2009), 13-20.
- [8] W. J. Spry, "A new interpretation of the transport and erection of large obelisks by ancient Egyptian engineers". *ERIC 2000*, US Patent 6, 739, 827 B2.
- [9] B. Andreotti, "Sonic sands". *Rep. Prog. Phys.*, Vol. 75 (2012), 24 pp.
- [10] R. A. Bagnold, *The physics of blown sand and desert dunes*, Methuen, London, 1941.
- [11] G. Szpiro, *Kepler's conjecture: How some of the greatest minds in history helped solve one of the oldest math problems in the world*, Wiley, New Jersey, 2003.
- [12] T. C. Hales, "A proof of the Kepler conjecture". *Annals of Mathematics*, Vol. 165 (2005), 1065-1185.
- [13] J. C. Maxwell, *Materia y movimiento*, Crítica, Barcelona, 2006.
- [14] J. C. Maxwell, "On the stability of the motion of Saturn's rings; an essay which obtained the Adams' Prize for the year 1856, in the university of Cambridge". *Monthly notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 19 (1859) 297-304.
- [15] P. Scholtz, M. Bretz, F. Nori, "Sound producing sand avalanches". *Contemporary Physics*, Vol. 38 (1997), 329-342.
- [16] Fort Monroe (Virginia). (24 de abril de 2024). <https://the-historymom.com/2020/05/20/fort-monroe-virginia/>
- [17] Rings of Saturn. (24 de abril de 2024). En Wikipedia [https://en.wikipedia.org/wiki/Rings\\_of\\_Saturn](https://en.wikipedia.org/wiki/Rings_of_Saturn)
- [18] K. van der Weele, "Granular gas dynamics: how Maxwell's demon rules in a non-equilibrium system". *Contemporary Physics*, Vol. 49 (2008), 157-178.
- [19] H. Corbí, J. Martínez-Martínez, "Interpretando ambientes sedimentarios: taller de sedimentología con arenas como actividad didáctica de Ciencias de la Tierra". *Enseñanza de las ciencias de la tierra*, Vol. 23 (2015), 242-252.

- [20] M. C. Powers, "A new roundness scale for sedimentary particles". *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 23 (1982), 117-119.
- [21] H. Al-Hashemi, O. Al-Amoudi, "A review on the angle of repose of granular materials". *Powder Technology*, Vol. 330 (2018), 397-417.
- [22] F. Elekes, E. Parteli, "An expression for the angle of repose of dry cohesive granular materials on earth and in planetary environments". *Applied Physical Science*, Vol. 118 (2021), 8 pp.
- [23] A basic guide to particle characterization. Malvern Instruments (2015).
- [24] Sand Battery (25 de abril de 2024). POLAR NIGHT ENERGY <https://polarnightenergy.fi/sand-battery>
- [25] 'A very Finnish thing': Big sand battery to store wind and solar energy using crushed soapstone (25 de abril de 2024) Euronews.green <https://www.euronews.com/green/2024/03/10/sand-batteries-could-be-key-breakthrough-in-storing-solar-and-wind-energy-year-round>
- [26] M. Arfa, N. Nilawar, A. Misba, M. Dayyan, M. A. Nadaf "Heat Storing Sand Battery", *IRJET*, Vol. 6 (2019), 3579-3583.
- [27] V. Ponce, Mejora con materiales granulares de calentadores solares de agua, Tesis SEPI ESIME Azcapotzalco IPN, 2023.
- [28] Premiar las innovaciones politécnicas con impacto social (17 de febrero de 2025). Proyecto: Innovación energética, la revolución de los bloques granulares <https://www.ipn.mx/english/press-releases/view-press-release.html?y=2024&n=19&t=17>
- [29] J. F. P. Ospina, V. Contreras, J. Estrada-Morales, D. Baresch, J. L. Ealo, K. Volke-Sepulveda, "Particle-Size effect in Airborne Standing-Wave Acoustic Levitation: Trapping Particles at Pressure Antinodes". *Physical Review Applied*, Vol. 18 (2022), 12 pp.
- [30] M. A. B. Andrade, N. Pérez, J. C. Adamowski, "Review of Progress in Acoustic Levitation". *Brazilian Journal of Physics*, Vol. 48 (2018), 190-213.
- [31] M. Sperl, "Experiments on corn pressure in silo cells – translation and comment of Janssen's paper from 1895". *Granular Matter*, Vol. 8 (2006), 59-65.
- [32] J. Klapp et al. (eds.), "Traction forces on rods in cylindrical silos". in *Experimental and Theoretical Advances in Fluid Dynamics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012
- [33] S. Hernández, T. Peña, H. Acuña, F. Montes, L. Yeomas, "Presión en medios granulares en silos: Experimentos para un curso de fluidos". *EPISTEMUS*, 2015, 84-89.
- [34] T. H. Wu, A. Watson, "In-situ shear test of soil-root systems". *Can. Geotech. J.*, Vol. 35 (1998), 579-590.

# La importancia del acero y su impacto en el medio ambiente: Estrategias e innovaciones para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> en la industria siderúrgica

Verónica Delgado-Álvarez<sup>1</sup>, Luis Enrique Jardón-Pérez<sup>1,2</sup>, Marco A. Ramírez-Argáez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Edificio D, Circuito de los institutos s/n, Cd. Universitaria, Del. Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México

<sup>2</sup> Cinvestav – Unidad Querétaro, Libramiento Norponiente no. 2000, Fracc. Real de Juriquilla, C. P. 76230, Querétaro. Qro., México

[vero\\_5\\_231@hotmail.com](mailto:vero_5_231@hotmail.com), [enriquejardon@quimica.unam.mx](mailto:enriquejardon@quimica.unam.mx), [marco.ramirez@unam.mx](mailto:marco.ramirez@unam.mx)

## Resumen

Este artículo aborda la relevancia del acero como un material impulsor del desarrollo en la sociedad y los desafíos medioambientales asociados con su producción, especialmente en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Se presentan las principales rutas de producción siderúrgica actuales, así como un análisis sobre la procedencia de este gas de efecto invernadero dentro del proceso de aceración con base en datos actuales. Se presentan tecnologías y estrategias de décadas pasadas, así como soluciones actuales para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, destacando la implementación de jets coherentes de oxígeno como una modificación en el horno de arco eléctrico, mejorando el proceso de descarburación y fomentando la eliminación del horno básico de oxígeno, uno de los mayores productores de CO<sub>2</sub> dentro de la industria siderúrgica.

## Palabras Clave

Acero, industria siderúrgica, emisiones de CO<sub>2</sub>, reducción de la huella de carbono, jets coherentes de O<sub>2</sub>, descarburación.

## Introducción

Se han desarrollado un sinnúmero de materiales que han contribuido al progreso y bienestar de la humanidad, incrementando su número cada día. Bases de datos como la de la página MatWeb [1] reportan tener más de 170 000 fichas técnicas de materiales diversos como metales, polímeros, cerámicos y compuestos, los cuales pueden ser usados en ámbitos científicos, tecnológicos y sociales.

A pesar de existir una masiva cantidad de materiales con infinidad de aplicaciones, existe uno que ha sido muy difícil de reemplazar. La abundancia de su materia prima, bajos cos-

tos de producción, elevadas y modificables propiedades físicas y mecánicas, y sus varios usos y aplicaciones en sectores como infraestructura, transporte, maquinaria, automotriz, producción y distribución de energía, entre muchas otras, lo han hecho indispensable en la mayoría de las industrias. Este material es el acero.

El acero es una aleación compuesta fundamentalmente de hierro-carbono, donde el carbono, no supera el 2.14 % en peso de su composición química. El acero puede contener otros elementos aleantes, los cuales modifican sus propiedades y, por ende, sus aplicaciones. El hierro, que es la base de la aleación, representa el 5 % de la superficie terrestre, lo que lo hace uno de los elementos más abundantes del planeta, además, su procesamiento para generar acero es altamente rentable. La industria siderúrgica es la encargada de transformar el mineral (y/o chatarra de hierro) en acero, ya sea en forma de barras, láminas, planchones, tochos y varillas [2].

En la siderurgia existen dos rutas principales para producir acero, la ruta integrada y la ruta no integrada o directa. Dentro de la ruta integrada hay dos sub rutas principales: Reactor de Reducción Directa – Horno de Arco Eléctrico (DR-EAF por sus siglas en inglés), y Alto Horno – Horno de oxígeno básico (BF-BOF por sus siglas en inglés). Ambas sub rutas inician con el mineral de hierro (óxidos) como materia prima y, una vez que el mineral es procesado en la planta de beneficio, pasa a través de un alto horno o de un horno de reducción directa. Estos reactores reducen el mineral en una aleación de hierro metálico que posteriormente se procesará para obtener las características de composición química que caracterizan al acero. La obtención del acero mediante las diferentes rutas es:

- En el caso de la sub ruta DR-EAF del horno de reducción directa se obtiene como producto hierro esponja (una fundición de hierro muy porosa). El hierro esponja pasa a un horno de arco eléctrico donde se funde y se eliminan los excesos de carbono, transformándose así en acero primario.
- Por otro lado, en la sub ruta BF-BOF del alto horno se obtiene como producto arrabio (una fundición de hierro saturada de carbono). Este arrabio se traslada a un horno BOF, donde a través de unas lanzas de inyección de oxígeno, el carbono disuelto en gran cantidad dentro del arrabio se oxida, eliminando del baño metálico el exceso de carbono y transformándose finalmente en acero primario.
- La ruta directa (Chatarra – Horno de Arco Eléctrico, Scrap-EAF, por sus siglas en inglés) usa como materia prima chatarra de hierro y acero, producto del reciclado. Esta chatarra pasa directo a un horno de arco eléctrico, el cual elimina los excesos de carbono para así obtener nuevamente acero.

El acero producido en los tres casos anteriormente mencionados se refina en un horno olla, donde se eliminan inclusiones y elementos residuales no deseados que afectan directamente la calidad del acero. Finalmente, el metal líquido pasa al proceso de colada continua donde se solidifica [3]. Estas rutas se pueden observar en la Figura 1.

Anualmente se producen 1885.7 millones de toneladas de acero [4]. Tan solo en México se producen 18.4 millones de toneladas anuales, que representan un 2.1 % del producto interno bruto del país, generando cerca de 672 mil empleos de manera directa e indirecta [5]. Nos encontramos rodeados de productos de acero, la vida como la conocemos no podría existir sin este material y cada día se encuen-



Figura 1. Esquema de las rutas de producción del acero. 1: Sub ruta DR-EAF. 2: Sub ruta BF-BOF. 3: Ruta directa. Imagen adaptada de [4]

tran nuevas aplicaciones para el mismo, así que la importancia del acero y de la industria siderúrgica es indiscutible.

El objetivo de este trabajo es informar sobre la importancia tecnológica y social del acero, sin olvidar las problemáticas y desafíos medioambientales asociados con su producción, en particular con las emisiones de dióxido de carbono. Del mismo modo, se busca dar a conocer las innovaciones y estrategias actuales que se están implementando en la industria siderúrgica para reducir dichas emisiones y desarrollar de manera más sostenible esta importante actividad industrial.

### El cambio climático y el acero

Si bien ya se dejó en claro que el acero ha sido una piedra angular en el desarrollo humano impulsando el progreso de la civilización, su fabricación, (enfocándonos solamente en la

industria siderúrgica, sin tomar en cuenta la extracción del mineral de hierro), tiene costos ambientales enormes. El CO<sub>2</sub> es un gas de efecto invernadero, esto quiere decir que tiene la capacidad de absorber y emitir radiación infrarroja, lo que ayuda a retener el calor en la atmósfera y contribuye al calentamiento global. Este calentamiento es el causante de alteraciones significativas en los patrones climáticos, dando lugar a fenómenos extremos como olas de calor, sequías, inundaciones y tormentas intensas, además, genera aumentos en el nivel del mar, afecta la biodiversidad, amenaza la seguridad alimentaria y tiene impactos negativos en la salud humana.

Según la base de datos en línea Our World in Data, en 2016, Climate Watch junto con el Instituto de Recursos Mundiales, reportó que ese año se produjeron aproximadamente 49.4 mil millones de toneladas globales de CO<sub>2</sub> y publicaron la gráfica de la Figura 2 que indica las emisiones de este gas de efecto invernadero por sector [6].

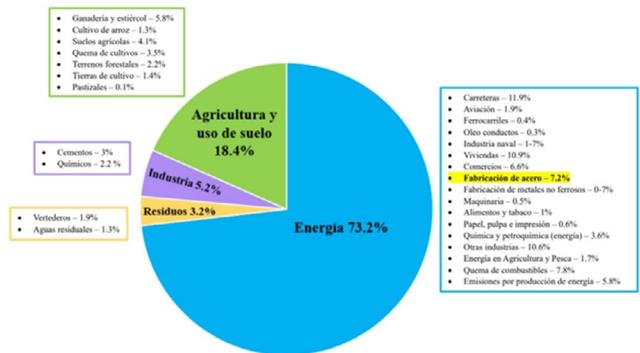


Figura 2. Emisiones globales de CO<sub>2</sub> por sector en el 2016. Datos tomados de Our World in Data [6]

Como se puede observar en la Figura 2, el sector energético produjo el 73.2 % de CO<sub>2</sub> en el 2016. Dentro de este sector se encuentra la industria siderúrgica, la cual produjo el 7.2 % de CO<sub>2</sub> (emisiones relacionadas únicamente con la energía procedente de la fabricación de

acero). Eso quiere decir que, para la elaboración del acero, se produjeron 3.56 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> en el 2016, cifra que en la actualidad ha ido incrementando.

En la Figura 3 se observa que entre el 2007 y el 2022, la World Steel reportó que se produjo un promedio de 1.83 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de acero producido [4]. Mientras que, en el mismo periodo de tiempo, The International Energy Agency reportó la producción promedio de 1.47 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de acero [7]. El promedio entre ambas asociaciones es de 1.65 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de acero que se produjo durante esos 15 años. Si tomamos en cuenta que cada año la producción de acero aumenta, las cifras presentadas en este trabajo seguirán incrementando, representando una seria alarma para el planeta.

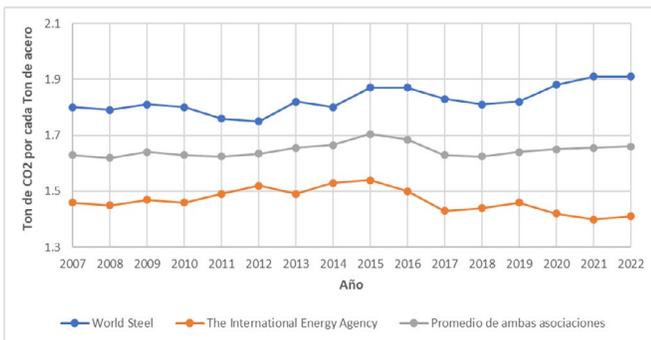


Figura 3. Toneladas de CO<sub>2</sub> producido por cada tonelada de acero fabricado por año, desde el 2007 hasta el 2022. Datos de la World Steel [4] (Línea azul con un promedio de 1.83 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de acero), The International Energy Agency [7] (línea naranja con un promedio de 1.47 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de acero) y el promedio de ambas asociaciones (línea gris con un promedio de 1.65 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de acero).

Pero, ¿exactamente de donde provienen estas emisiones dentro del proceso para fabricar el acero? Anteriormente se mencionaron las tres rutas de aceración: DR-EAF, BF-BOF y Scrap-EAF; en la Figura 4 se puede observar una gráfica actual con datos de la World Steel Association de 2021 y 2022 [4]. En ella se comparan las tres rutas de aceración con base en

las toneladas de dióxido de carbono producidas por cada tonelada de acero y, según esta asociación, la ruta BF-BOF es la que mayores emisiones de CO<sub>2</sub> produce.

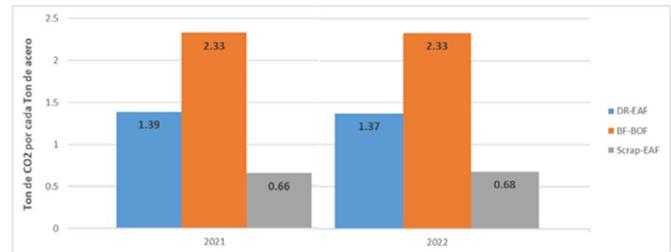


Figura 4. Toneladas de CO<sub>2</sub> producidas por tonelada de acero en las diversas rutas de aceración en los años 2021 y 2022. Datos tomados de la World Steel [4]

La diferencia entre las emisiones de dióxido de carbono en cada una de las rutas para producir acero son considerables. La ruta BF-BOF ha sido históricamente dominante, pero sus altas emisiones de CO<sub>2</sub>, a comparación de las otras rutas de aceración, se deben a la dependencia del coque como fuente de energía térmica para calentar, fundir y producir acero. El coque es un combustible a base de carbón que, al quemarse, libera grandes cantidades de este gas de efecto invernadero.

Por otro lado, la ruta DR-EAF sustituye parcial o totalmente al coque con gas natural o gas hidrógeno, reduciendo significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub>; mientras que la ruta Scrap-EAF utiliza chatarra de acero como principal materia prima, donde, al reciclar el acero, se evitan las emisiones asociadas con la producción de hierro a partir de mineral. Además, estas dos rutas usan horno de arco eléctrico, el cual permite el uso de electricidad proveniente de fuentes limpias (como las energías renovables), lo que contribuye a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Aunque el reciclaje de acero para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> pareciera la mejor alternativa, de momento es imposible satisfacer la

demanda de acero por parte de la población únicamente con material reciclado. Es por ello que inevitablemente se seguirá utilizando mineral en los próximos años.

### Mejoras y acciones en la industria siderúrgica para reducir la huella de CO<sub>2</sub> en la atmósfera

Pareciera que la producción de CO<sub>2</sub> de los procesos antes descritos fuera inevitable, siendo el acero tan importante en nuestra vida diaria y teniendo cada vez más demanda per cápita del mismo. Sin embargo, si bien los procesos siderúrgicos están bien establecidos, es importante señalar que hay esfuerzos actuales para intentar modificar estos procesos, buscando una mayor eficiencia energética y una reducción en la producción de CO<sub>2</sub>.

En 1994, J. Szekely y G. Trapaga [8] dedicaron parte de su artículo a analizar los avances y desafíos de ese momento para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en la industria siderúrgica. Para lograr esto, ellos propusieron la implementación de tecnologías y procesos energéticamente eficientes a través del diseño de los hornos, el aumento del uso de chatarra, la optimización del consumo de energía usando fuentes combustibles bajas o nulas en carbono, como la reducción directa (DR) y la implementación de un proceso creado por la empresa Polysius para la mejora en el proceso de desulfuración. En este último caso los autores mencionan que Polysius llevó a cabo una extensa investigación para optimizar el proceso de desulfuración del acero en carros torpedo a través de diversos cambios en los parámetros de agitación de la olla, como lo son: el tipo y posición de la lanza, la profundidad de inserción, el tipo y cantidad de gases usados y la tasa de inyección de los agentes desulfurantes. Para este proceso en específico se reportó la reducción de un 28 % en las emisiones de gases contaminantes.

En 2018, G. Wei y colaboradores [9] escribieron un artículo en el que explican una novedosa técnica para hacer más eficiente el proceso de aceración mediante el uso cíclico del gas CO<sub>2</sub>. Mencionan que el dióxido de carbono proveniente de la fabricación de acero puede ser recuperado e inyectado junto con O<sub>2</sub> (oxígeno) a través de jets coherentes dentro de un horno de arco eléctrico (EAF). Encontraron que el reciclaje, recirculación y uso de CO<sub>2</sub> dentro del proceso aumentaba la eficiencia de la producción, fortalecía la agitación del baño metálico y mejoraba la eliminación de nitrógeno. Del mismo modo, reciclaron y recircularon gas CO<sub>2</sub>, el cual inyectaron desde el fondo de un horno olla (LF). En este proceso reportaron un aumento en la tasa de desulfuración y mejora en la eliminación de inclusiones. Ambos resultados mostraron mejoras positivas en la calidad del acero y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. En este caso, la modificación al proceso no reduce tan significativamente la producción de CO<sub>2</sub>, pero permite aprovecharlo antes de que sea liberado a la atmósfera. Este proceso se puede ver esquemáticamente en la Figura 5.

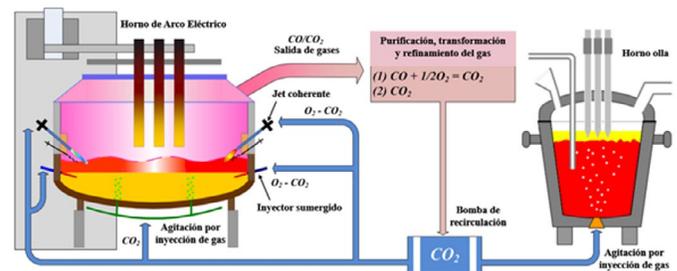


Figura 5. Uso cíclico del CO<sub>2</sub> en el proceso de fabricación de acero por EAF-LF. Imagen adaptada de [9]

Otra tecnología naciente es la modificación del horno de arco eléctrico, EAF, para que, en él, se procese arrabio, una aleación de hierro con un alto contenido de carbono y otros contaminantes provenientes del alto horno. Como ya se mencionó en apartados anteriores, el arrabio (históricamente) se procesa en el horno básico

de oxígeno, BOF, siendo esta ruta de aceración la que más emite gases de  $\text{CO}_2$  durante su proceso. Por otro lado, el EAF tradicional no es capaz de procesar un material con tan alto contenido de carbono y convertirlo en acero primario. Para eliminar el exceso de carbono del arrabio es necesario inyectar oxígeno y, de esta manera, oxidar dicho elemento.

La modificación propuesta en el EAF consiste en implementar jets coherentes de oxígeno dentro del horno y poder llevar a cabo un proceso de descarburación (eliminación de carbono del baño de acero) para, de esta manera, permitir el procesamiento del arrabio dentro de este reactor (y así poder obtener acero de alta calidad metalúrgica). Los jets coherentes son chorros de oxígeno que se inyectan en la superficie del baño metálico a velocidades supersónicas, llevando a cabo un procesamiento muy rápido del metal, al acelerar la cinética de descarburización. Sin embargo, los jets supersónicos tienen el problema de que pierden rápidamente su alta velocidad al entrar en contacto con la atmósfera, además de que la física del jet provoca una caída de temperatura grande al alcanzar velocidades que superan la velocidad del sónico. Es por ello que los jets coherentes usan una llama envolvente, la cual se produce a través de una entrada secundaria de oxígeno y combustible que rodea el jet. Esta flama que envuelve al jet de oxígeno ayuda a prevenir el atrapamiento de otros gases hacia el mismo jet y, por ende, ayuda a reducir la atenuación del chorro de oxígeno. En otras palabras, ayuda a que el chorro de oxígeno impacte en el baño de acero líquido con una muy alta velocidad e inercia, además de incrementar la temperatura del mismo. Gracias a esta condición, el oxígeno puede penetrar profundamente en el baño, realizando de manera eficiente la descarburación del acero fundido. Este proceso se puede ver esquematizado en la Figura 6.



Figura 6. Esquema de la inyección de un jet coherente en un horno de arco eléctrico

El EAF es un horno que, como ya se ha venido mencionando, usa energía eléctrica y produce menores emisiones de  $\text{CO}_2$ . Al implementar la modificación anteriormente descrita se podría ir eliminando paulatinamente el uso del horno básico de oxígeno, BOF, lo que, por consecuencia, ayudaría a disminuir las emisiones de este gas, además de hacer más eficiente el proceso de aceración al poder ingresar tres productos (hierro esponja, chatarra y arrabio) al horno y poderlos transformar en acero.

Es pertinente mencionar que en 2022, la World Steel Association, en su programa de acción climática, dio a conocer una serie de objetivos a lograr en los siguientes 30 años con la finalidad de disminuir las emisiones de  $\text{CO}_2$ . Los más destacables son: usar combustibles que contengan hidrogeno, hacer uso de la energía eléctrica proveniente de fuentes limpias como la eólica, preferir como materia prima la chatarra de acero y disminuir las cantidades de mineral de hierro dentro del proceso de aceración, recuperar calor a partir de corrientes sólidas y gaseosas, enfriar en seco el coque, ahorrar electricidad y mejorar el mantenimiento de una planta siderúrgica para reducir el tiempo de proceso, reduciendo así el uso de energía por tonelada de acero [4].

## Conclusiones

La producción de acero tiene costos importantes desde el punto de vista medioambiental. Las altas emisiones de CO<sub>2</sub> al fabricarlo son un factor considerable dentro del cambio climático. A pesar de ello, el acero es actualmente un material indispensable para la humanidad y lo seguirá siendo muchos años más debido a sus importantes propiedades y usos diversos. Es por eso que a lo largo de los años se han estado tomando medidas importantes dentro de la industria siderúrgica para disminuir la huella de CO<sub>2</sub>, acciones que van desde mejorar u optimizar ciertos procesos, hasta cambiar combustibles por energías más limpias.

Aunque las nuevas tecnologías dentro de la producción de acero estén siendo encaminadas hacia un futuro más ecológico, la industria siderúrgica va a seguir produciendo gases de efecto invernadero. Pero eso no imposibilita lograr una reducción del CO<sub>2</sub> en la atmósfera proveniente de este sector. Las mejoras en los procesos dentro de la siderurgia no solo fomentan la optimización y la eficiencia de estos, sino que también fomentan acciones más sustentables, ayudando un poco a la salud de nuestro planeta.

## Referencias

- [1] MatWeb. Material Property Data. (5 de noviembre de 2023). "Fuente de información sobre materiales". Liga: <https://www.matweb.com/index.aspx>
- [2] G. F. Merlone. "La Siderurgia". Posgrado de Siderurgia, U.T.N. Facultad Regional Buenos Aires, 2003, pp 1-4 y 23-26.
- [3] V. Delgado. "Modelado físico del mezclado químico en distribuidores de colada continua del acero". Tesis para obtener el grado de Ingeniera Química Metalúrgica. Universidad Autónoma de México. 2023. pp 1-4
- [4] World Steel. (5 de noviembre de 2023) "Informe: Indicadores de Sostenibilidad 2023. Desempeño de sostenibilidad de la industria siderúrgica 2004-2022". Liga: <https://worldsteel.org/steel-topics/sustainability/sustainability-indicators-2023-report/>
- [5] Canacero. El acero de Mexico (9 de noviembre de 2023) "Radiografía de la Industria del Acero en México 2023". Liga: <https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico.php#tab-13>

- [6] H. Ritchie. "Sector por sector: ¿de dónde provienen las emisiones globales de gases de efecto invernadero?". Our World in Data, 2020. (2 de noviembre de 2023). Liga: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>
- [7] International Energy Association. (2 de noviembre de 2023) "¿Cuál es el papel del hierro y el acero en las transiciones a energías limpias?". Liga: <https://www.iea.org/energy-system/industry/steel>
- [8] J. Szekely and G. Trapaga "Some perspectives on new steelmaking technologies". Metallurgical Plant and Technology International, VOL 17(4), (1994), pp 30-47.
- [9] G. Wei et al. "Technological Innovations of Carbon Dioxide Injection in EAF-LF Steelmaking". JOM, VOL 70(6), (2018), pp 969-976

# Reología dilatacional de proteínas en interfase fluida

**María Guadalupe Sosa Herrera**

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Teoloyucan Km 2.5, San Sebastián Xhala, 54714 Cuautitlán Izcalli, Estado de México  
[mgsosah@cuautitlan.unam.mx](mailto:mgsosah@cuautitlan.unam.mx)

## Resumen

Los estudios sobre reología dilatacional han ido adquiriendo mayor auge, particularmente en relación con el estudio de las propiedades viscoelásticas de películas de proteínas adsorbidas en una interfase fluida. Se presenta una breve descripción de la reología de interfase y el comportamiento de las proteínas en interfase, esto último acompañado de una comparación simple de los resultados experimentales sobre la elasticidad superficial dilatacional dinámica de dispersiones de proteínas de distinto origen. Esta tiene relación directa con las propiedades de monocapa de la proteína adsorbida en interfase, debido a que entre más densa es la monocapa, también es más rígida. Esto puede afectar la velocidad de los procesos de inestabilidad de sistemas dispersos.

## Palabras clave

Reología dilatacional, proteínas, interfase, viscoelasticidad.

La reología de interfase describe la relación entre la tensión y la deformación de una interfase, donde el medio continuo se considera bidimensional (2D) (Krotov, 2009) y actualmen-

te desempeña un papel importante en numerosas aplicaciones industriales, comerciales y científicas. Algunas de estas aplicaciones se encuentran en la elaboración y la estabilidad de dispersiones del área farmacéutica y alimenticia, como emulsiones y espumas, entre otras (Tseng et al 2022). En general, existen tres tipos de deformaciones en la reología de interfase: dilatación, cizallamiento y flexión, y principalmente se han estudiado las deformaciones por dilatación y cizallamiento. En la reología dilatacional, el área de una interfase aumenta o disminuye mientras que la forma de la interfase permanece igual, a diferencia de la reología de interfase por cizallamiento, donde la forma de la interfase cambia mientras que su área se mantiene constante (Krotov, 2009). En las últimas décadas ha aumentado el interés por la reología dilatacional, ya que las propiedades dilatacionales desempeñan un papel importante en la hidrodinámica de la interfase (Tseng et al 2022).

En reología dilatacional de interfase, la prueba consiste en medir la tensión de la superficie o la interfase cuando cambia el área de ésta. En los ensayos de expansión-compresión, las

propiedades viscoelásticas de la interfase se caracterizan por el módulo elástico dilatacional 2D,  $E_d$  (Ecuación 1) y la viscosidad dilatacional 2D,  $\eta_d$  (Ecuación 2) (Benjamins & Lucassen-Reynder, 2009; El Omari et al 2022).

$$E_d = A_0 \frac{d\gamma}{dA} = \frac{d\gamma}{d \ln A} \quad (1)$$

$$\eta_d = \frac{d\gamma}{d \ln A / dt} \quad (2)$$

donde  $A_0$  es el área inicial de la interfase,  $\gamma$  es la tensión superficial y  $A$  es el área de la interfase en el tiempo  $t$ . En el caso de mediciones oscilatorias (cambio armónico de la interfase a frecuencia constante,  $\omega$ ), se puede observar un cambio sinusoidal en la tensión superficial con la presencia de un desplazamiento de fase; esto es posible debido a la naturaleza viscoelástica de la interfase. Con una deformación de baja amplitud, la respuesta de la interfase (variación de la tensión de superficie) es lineal, por lo que se puede expresar de acuerdo con las Ecuaciones 3 y 4 (El Omari et al 2022):

$$\gamma = \gamma_0 + \Delta\gamma \sin(\omega t + \delta) \quad (3)$$

$$A = A_0 + \Delta A \sin(\omega t) \quad (4)$$

donde  $\Delta A$  y  $\Delta\gamma$  son la amplitud del área de interfase y de la tensión superficial, respectivamente, mientras que  $A_0$  y  $\gamma_0$  son, respectivamente, el área de interfase y la tensión superficial justo antes de la deformación oscilatoria y  $\delta$  es el ángulo de desfase.

Existen diversas técnicas para determinar las propiedades viscoelásticas dilatacionales de una interfase, incluyendo el tensiómetro de gota colgante (Figura 1), el cual tiene como objetivo inducir un cambio controlado en el área de la interfase y medir la respuesta resultante (Maradiaga Rivas et al., 2024).

Esto se basa en el estudio de la forma de una gota colgante líquida (o gaseosa) o el de una

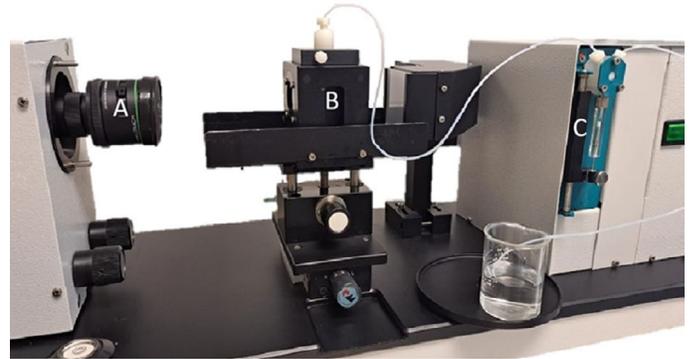


Figura 1. Tensiómetro de gota colgante, PAT 1, Sinterface. A) Cámara, B) Capilar donde se forma la gota, C) Control de volumen

gota ascendente, todo en el extremo de un capilar dentro de otra fase líquida o gaseosa. La forma de la gota depende de la tensión en la interfase, que tiende a hacerla esférica, y de la diferencia entre la densidad de los dos fluidos (efectos gravitatorios), que tiende a expandir la gota y cambia su forma esférica, adoptando una forma más elongada. En términos teóricos, en equilibrio, la gota obedece a la ecuación de Young-Laplace que relaciona la presión de Laplace tanto con el radio de curvatura como con la tensión de interfase (Ecuación 5) (Berry et al., 2015).

$$\gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \Delta P = \Delta P_0 - \Delta \rho g z \quad (5)$$

donde  $\gamma$  es la tensión de interfase.  $R_1$  y  $R_2$  son, respectivamente, el primer y segundo radio principal de curvatura.  $\Delta P = P_{int} - P_{ext}$  es la presión de Laplace, que es la diferencia de presión a través de la interfase. Asimismo,  $\Delta P_0$  es una presión de referencia en  $z=0$ , mientras que  $\Delta \rho g z$  es la presión hidrostática;  $\Delta \rho = \rho_g - \rho_c$  es la diferencia de densidad entre la fase que forma la gota y la densidad de la fase continua.

En las últimas décadas, el estudio de las propiedades reológicas de interfaces formadas por capas o películas de proteína ha tomado auge, puesto que las proteínas son los agentes tensioactivos más importantes en la mayoría

de las emulsiones, espumas y otros coloides alimentarios. Esto es debido a que suelen adsorberse en la superficie de los líquidos formando películas, cuyas propiedades mecánicas tienen una fuerte influencia en el proceso de formación, así como en la estabilidad de espumas y emulsiones que se utilizan con frecuencia en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética (Noskov, 2014).

Al adsorberse en una interfase, las proteínas suelen desplegarse y adoptar una conformación óptima, de modo que las partes hidrófobas de la molécula se adhieren a la interfase, mientras que las partes hidrófilas entran en contacto óptimo con la fase acuosa (Dan et al., 2013).

Las investigaciones sobre la reología de dilatación de las películas proteicas se centran, principalmente, en la determinación del módulo de dilatación ( $E_d$ ). Este parámetro caracteriza las propiedades mecánicas de las películas proteicas y cuantifica su estabilidad y resistencia a los cambios de área de la interfase (Maradiaga Rivas et al., 2024). En la Tabla 1 se comparan valores del módulo elástico dilatacional de proteínas de distinto origen.

Tabla 1. Módulo elástico dilatacional,  $E_d$ , de proteínas de distinto origen

Proteína/origen	$E_d$ (mN/m) a 0.1 Hz Interfase líquido/aire (pH~7)
Beta caseína	~ 30**
Beta lactoglobulina	~ 80**
Caseinato de sodio	13.6 ± 0.34*
Concentrado de suero de leche	76.2 ± 1.06*
Chícharo	17.8 ± 0.52*
Semilla de calabaza	31.5 ± 0.49*
Arroz	22.7 ± 0.30*

\*Datos experimentales, \*\*Fainerman et al., 2020.

Las propiedades viscoelásticas de las películas de proteína en interfase están determinadas por una compleja interacción de varios facto-

res, entre otros, la rigidez y la conformación de las moléculas proteicas, la cobertura de la superficie, el grado de desnaturalización en la interfase y la fuerza de la interacción intermolecular entre las moléculas proteicas adsorbidas, además de estar fuertemente influenciadas por las condiciones del disolvente (pH, fuerza iónica) y el tipo de fase hidrófoba (gas o líquido) (Tseng et al 2022).

Todo lo anterior incide en que la naturaleza de la proteína es un factor importante que determina las propiedades reológicas de la interfase, de tal forma que una mayor elasticidad explica una estructura más rígida, como resultado de interacciones hidrófobas más intensas. También se ha reportado que los módulos que caracterizan una interfase pueden estar directamente relacionados con el grado en que la proteína se reorganiza en la misma (Dan et al 2013). En estudios con aislados de proteína de chícharo comerciales se ha observado que contienen agregados solubles que no sufren reordenamientos estructurales tras la adsorción, mientras que proteínas de chícharo que han sido purificadas, sin exposición a tratamiento térmico, sufren reordenamientos estructurales durante la adsorción. Estas diferencias en la dinámica de adsorción entre las proteínas agregadas y las nativas afectan a las propiedades viscoelásticas de la interfase y, en última instancia, a la estabilidad de las emulsiones estabilizadas por ellas (Grasberger et al., 2024).

Por otro lado, en términos prácticos se ha demostrado que el alto módulo elástico de la capa de proteína adsorbida contribuye a reducir la velocidad de maduración de Ostwald en espumas estabilizadas con éstas. De igual manera, la coalescencia puede frenarse aumentando la resistencia de la película a la rotura, que se cree que depende de la viscoelasticidad de la interfase (Delforce et al 2023).

Se agradece el apoyo a la Cátedra CI2455, de la FES Cuautitlán, UNAM.

## Referencias

- Benjamins, J., & Lucassen-Reynder, E.H. (2009). Interfacial rheology of adsorbed protein layers. In R. Miller & L. Liggieri (Eds.), *Interfacial rheology* (1st ed., pp. 253-302). Brill.
- Berry, J. D., Neeson, M. J., Dagastine, R. R., Chan, D. Y. C., & Tabor, R. F. (2015). Measurement of surface and interfacial tension using pendant drop tensiometry. *Journal of Colloid and Interface Science*, 454, 226–237.
- Dan, A., Gochev, G., Krägel, J., Eugene V. Aksenenko, E. V., Fainerman, V. B., & Miller, R. (2013). Interfacial rheology of mixed layers of food proteins and surfactants. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 18, 302–310.
- Delforce L., Nardello-Rataj, V., Lebeuf, R., Aubry, J. M., & Ontiveros, J. F. (2023). Self-aggregation, dilational surface rheology and foaming properties of 1-O-dodecyl diglycerol ether compared to n-dodecyl- $\beta$ -D-maltoside and pentaethyleneglycol monododecyl ether. *Journal of Molecular Liquids*, 388, 122795.
- El Omari, Y., Yousfi, M., Duchet-Rumeau, J., & Maazouz, A. (2022). Recent advances in the interfacial shear and dilational rheology of polymer systems: from fundamentals to applications. *Polymers*, 14, 2844.
- Fainerman, V. B., Aksenenko, E. V., Makievski, A. V., Trukhin, D. V., Yeganehzad, S., Gochev, G. (2020). Surface tension and dilational rheology of mixed  $\beta$ -casein –  $\beta$ -lactoglobulin aqueous solutions at the water/air interface. *Food Hydrocolloids*, 105, 105883.
- Grasberger, K.F., Lund, F.W., Adam Cohen Simonsen, A.C., Hammershøj, M., Fischer, P., & Corredig, M. (2024). Role of the pea protein aggregation state on their interfacial properties. *Journal of Colloid and Interface Science*, 658, 156–166.
- Krotov, V. V. (2009). Fundamental introduction into 2D rheology. In R. Miller & L. Liggieri (Eds.), *Interfacial rheology* (1st ed., pp. 1-37). Brill.
- Maradiaga Rivas, J. E., Hussain, S., Tseng, W.C., Boris Noskov, B., & Lin, E.Y. (2024). A study on the dilational modulus of adsorbed globular protein films – under a near periodic area fluctuation and rapid surface perturbation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 155, 105288.
- Noskov, B.A. (2014). Protein conformational transitions at the liquid–gas interface as studied by dilational surface rheology. *Advances in Colloid and Interface Science*, 206, 222–238.
- Tseng, W.C., Tsay, R.Y., Le, T.T-Y., Hussain, S., Noskov, B.A., Akentiev, A., Yeh, H.H., & Lin, S.-Y. (2022). Evaluation of the dilational modulus of protein films by pendant bubble tensiometry. *Journal of Molecular Liquids*, 349, 118113.

# Estudio del comportamiento reológico de un sistema gelante empleando el principio de superposición tiempo-temperatura-concentración

Luis Medina-Torres<sup>1</sup>, Diola-Marina Nuñez Ramirez<sup>2</sup>, Ma. Josefa Bernad-Bernad<sup>1</sup>, Angel Manuel Cabrales-González<sup>3</sup>, Lucila Concepción Nuñez-Bretón<sup>4</sup>, Maricela Zapata-Arroyo<sup>4</sup>, O. Manero<sup>4</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> Departamento de Ingenierías Química y Bioquímica, Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Durango, Blvd. Felipe Pescador 1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya, C.P. 34080 Durango, Dgo. México

<sup>4</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

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

## Introducción

El creciente interés por estudiar una amplia variedad de biopolímeros de origen natural con propiedades funcionales novedosas en los sistemas acuosos donde estos intervienen ha motivado la investigación de las propiedades estructurales, mecánicas y reológicas de estos materiales. Sin embargo, el grado de avance es aún muy limitado. La capacidad que tienen algunos biopolímeros de presentar cambios estructurales se conoce como propiedades funcionales, de las cuales se pueden mencionar: la gelificación, capacidad de incrementar la viscosidad, estabilización de suspensiones,

emulsificación y capacidad de retención de agua, entre otras. Dichas propiedades son susceptibles de afectarse al variar algún parámetro fisicoquímico (temperatura) o composición. La *kappa*-carragenina es un biopolímero, con una amplia aplicación en la industria química debido a sus propiedades funcionales (forman geles termorreversibles), además, este material es termo-reológicamente simple (TRS), es decir, tiene un comportamiento de relajación similar con cambios de temperatura y/o concentración (Pacheco-Quito *et al.*, 2020; Sangeetha *et al.*, 2020). Ante la creciente demanda comercial por el empleo de sistemas

gelificantes que puedan solucionar problemas específicos en la industria química, surge la necesidad de un mejor entendimiento de la respuesta mecánica al flujo de este tipo de biopolímeros gelantes, en un intervalo más amplio de temperaturas y concentraciones que aquellas obtenidas en los reómetros convencionales. Una alternativa interesante y prometedora es el empleo de una herramienta reológica, como lo es el principio de superposición tiempo-temperatura (TTS) y la superposición tiempo-temperatura-concentración (TTSC). Esta permite expandir la ventana de observación y determinar cómo estos sistemas gelantes se comportan ante cambios de temperatura y concentración, siempre y cuando sean sistemas TRS. Ampliar la ventana de observación de estos espectros mecánicos es fundamental para mejorar la predicción de las propiedades estructurales y funcionales de estos sistemas gelantes, lo que es crucial en el diseño de procesos y productos (Dorléans *et al.*, 2021; Yin *et al.*, 2018).

### Propiedades reológicas de la *kappa*-carragenina

La *kappa*-carragenina es un biopolímero lineal sulfatado proveniente de cierto tipo de algas marinas (*Rhodophyta*). Posee propiedades gelificantes y estabilizantes. Su estructura química se compone de unidades de galactosa y 3,6-anhidrogalaactosa, con grupos sulfatos que le confieren capacidades para formar geles termorreversibles en presencia de cationes específicos, como el potasio (Agostinho *et al.*, 2020; Jiang *et al.*, 2022; Russo Spina *et al.*, 2022). Estos geles presentan una amplia aplicación en la industria de alimentos, cosmética, farmacéutica, textil, biotecnológica y química. Sin embargo, el comportamiento mecánico al flujo está muy limitado experimentalmente a un rango finito de tiempos en un espectro reométrico convencional en

donde las propiedades mecánicas al flujo de estos sistemas (TRS) pueden variar varios órdenes de magnitud al cambiar la temperatura, el tiempo de observación y la concentración. Una alternativa interesante e innovadora para estimar en una ventana más amplia el comportamiento reológico es la aplicación del principio TTS y el principio TTSC, que desplaza la ventana de observación en los espectros de flujo con la temperatura-tiempo y, finalmente, con la concentración (Dorléans *et al.*, 2021; Medina-Torres *et al.*, 2024; Yin *et al.*, 2018).

### Metodología

La caracterización reológica de la *kappa*-carragenina, se llevó a cabo en un reómetro de esfuerzo controlado (Figura 1) empleando una geometría de platos paralelos rugosos con un gap de 500  $\mu\text{m}$ . Las pruebas reométricas de relajación de esfuerzos y de viscoelasticidad lineal se llevaron a cabo para cada concentración a diferentes temperaturas y, posteriormente, ambas pruebas viscoelásticas se superpusieron usando un factor de desplazamiento horizontal ( $a_T$ ) a una temperatura de referencia única, para formar una sola curva maestra para cada concentración.

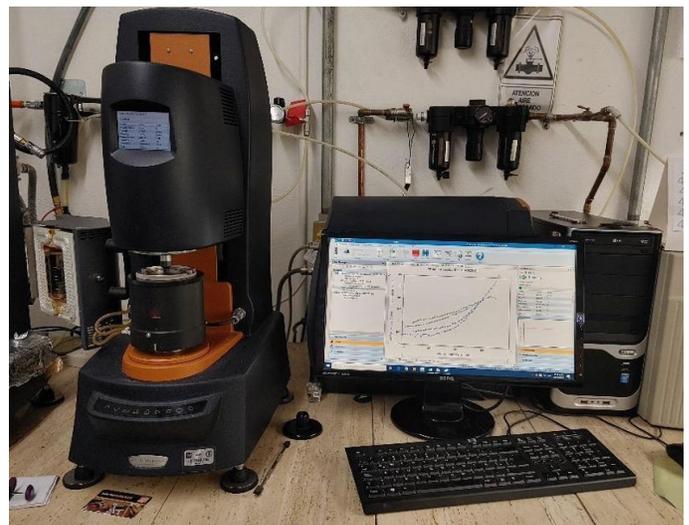


Figura 1. Reómetro de esfuerzo controlado modelo DHR-3 (TA Instruments, USA).

Para la construcción de la curva maestra se realizaron las pruebas de relajación de esfuerzos con muestra recién preparada una concentración fija y a varias temperaturas, las muestras se sometieron a una deformación relativa de cierta magnitud y se registró el módulo de relajación en función del tiempo  $G(t)$ . Posteriormente, se transformaron los datos obtenidos en la prueba de relajación de esfuerzo pasando del espacio del tiempo a la ventana de frecuencias mediante la transformada de Fourier (Ecuación 1) (Shanbhag & Joshi, 2022; Tang et al., 2021):

$$F[f(t)] = F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

Los espectros mecánicos dinámicos obtenidos de los módulos viscoelásticos ( $G'$  y  $G''$ ) en función de las frecuencias fueron a tiempos largos (frecuencias bajas). Cabe mencionar que, mediante estas pruebas de relajación de esfuerzos, se pudo observar un punto de cruce (tiempo de relajación,  $\lambda$ ), es decir, cuando  $G''=G'$ . Por otro lado, las curvas de flujo de cizalla oscilatorio de pequeña amplitud de deformación dentro de la zona viscoelástica lineal ( $G'$  y  $G''$  en función de la frecuencia,  $\omega$ ) (SAOS) se obtuvieron con muestras recién preparadas para analizar en el reómetro, es decir, para cada concentración y a diferentes temperaturas, todos los espectros de flujo oscilatorio se llevaron a cabo en una ventana de observación de 0.1 a 300 rad/s dentro de la zona lineal.

### Aplicación del principio de superposición Tiempo – Temperatura (TTS) y Tiempo – Temperatura – Concentración (TTCS)

La aplicación del principio de superposición tiempo-temperatura consiste en (con los espectros reométricos obtenidos) desplazar la ventana de observación de manera horizontal

en los espectros de flujo con la temperatura-tiempo-concentración a una curva de referencia para la *kappa*-carragenina. Así pues, para extender el rango de observación de la respuesta mecánica de las curvas viscoelásticas (módulo elástico,  $G'$  y módulo viscoso,  $G''$ ) a frecuencias no accesibles experimentalmente para este tipo de biomateriales (TRS), se aplicó el Principio de TTS. Este principio se basa en la equivalencia entre los efectos del tiempo y temperatura en la respuesta viscoelástica (TRS). En este biomaterial, primero se prepararon soluciones a distintas concentraciones de la *kappa*-carragenina (1, 2, 3 y 4 % p/v). Posteriormente, se realizan en un reómetro las pruebas de relajación de esfuerzos y, por otro lado, con muestras recién preparadas (para evitar que estas se degraden con el tiempo). Se realizaron las pruebas de flujo de cizalla oscilatorio de pequeña amplitud (SAOS) dentro de la zona viscoelástica lineal. En la **Figura 2a** se muestran los espectros de relajación para una solución de 1 % (p/v) de *kappa*-carragenina a una temperatura de referencia de 25 °C, presentando un comportamiento monoexponencial en deformaciones inferiores al 30 %. No obstante, a una deformación mayor, el comportamiento del material pierde la linealidad. Empleando la transformada de Fourier como se mencionó previamente es posible obtener los módulos viscoelásticos (módulo elástico,  $G'$ , y módulo viscoso,  $G''$ ) como función de la frecuencia, al pasar del dominio tiempo al dominio de frecuencia para cada una de las condiciones experimentales estudiadas (Zhu et al., 2020) (**Figura 2b**).

Así pues, las pruebas reométricas se llevaron a cabo variando la temperatura de la *kappa*-carragenina (5, 10, 25, 37 y 45 °C) para cada una de las concentraciones fijas (1, 2, 3 y 4 % p/v). Para todos los espectros se puede observar un punto de cruce entre los módulos de al-

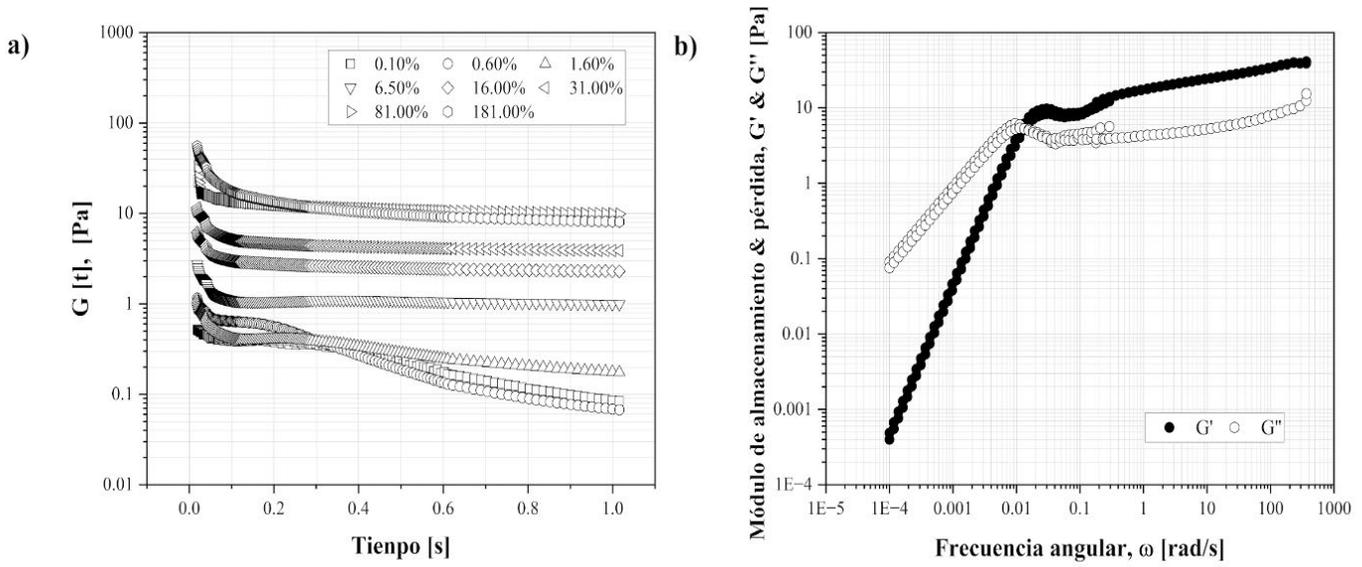


Figura 2. Datos experimentales obtenidos en (a) prueba de relajación de tensión y (b) pruebas SAOS para 1 % (p/v) a 25 °C.

macenamiento ( $G'$ ) y pérdida ( $G''$ ), revelando un tiempo característico de relajación del biomaterial, o "punto de gelificación". Después de esta intersección cambia el comportamiento del biomaterial, adoptando una respuesta de un gel ( $G' > G''$ ), es decir, pasa de un líquido viscoso a un estado de gel a frecuencias altas (y tiempos cortos) (Chambon & Winter, 1985). Posteriormente, para cada una de las curvas de flujo obtenidas a diferentes temperaturas y a cada concentración fija (Figura 3) se desplazó horizontal y verticalmente a lo largo de la escala de frecuencia a una temperatura de referencia (25 °C), dando como resultado una curva maestra (TTS) única, para cada concentración (Meneses *et al.*, 2023; Yin *et al.*, 2018). La superposición de la curva se genera aplicando factores de desplazamiento horizontal ( $a_T$ ) y vertical ( $b_T$ ).

Como se mencionó, el principio de TTS selecciona una temperatura de referencia (curva isotérmica) a partir de la cual se aplican los factores de corrimiento ( $a_T$ , horizontal y  $b_T$ , vertical) para superponer los datos reométricos obtenidos de otras curvas de temperatura

a la curva isotérmica de referencia. Una vez aplicados los factores de desplazamiento para cada temperatura se obtiene la superposición de las curvas sobre la curva de referencia y se forma una curva maestra (TTS) única que describe el comportamiento viscoelástico de la *kappa*-carragenina en un rango extendido de frecuencias (tiempos) (Balogun *et al.*, 2021; Dorléans *et al.*, 2021).

Con el objetivo de describir el efecto de la temperatura sobre las propiedades viscoelásticas de este material, se emplearon los modelos de Williams-Landel-Ferry (WLF) y/o Arrhenius, Ecuación 2 y 3, respectivamente:

$$\log \log a_T = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (2)$$

$$\log \log a_T = \frac{E_a}{R(T - T_0)} \quad (3)$$

Donde la elección del modelo depende del tipo de biomaterial, ya sea si presentan una alta dependencia de la temperatura en sus propiedades viscoelásticas (WLF) o si presentan una cinética de activación al flujo (Arrhenius) (Ahmed, 2017; Ferry, 1980).

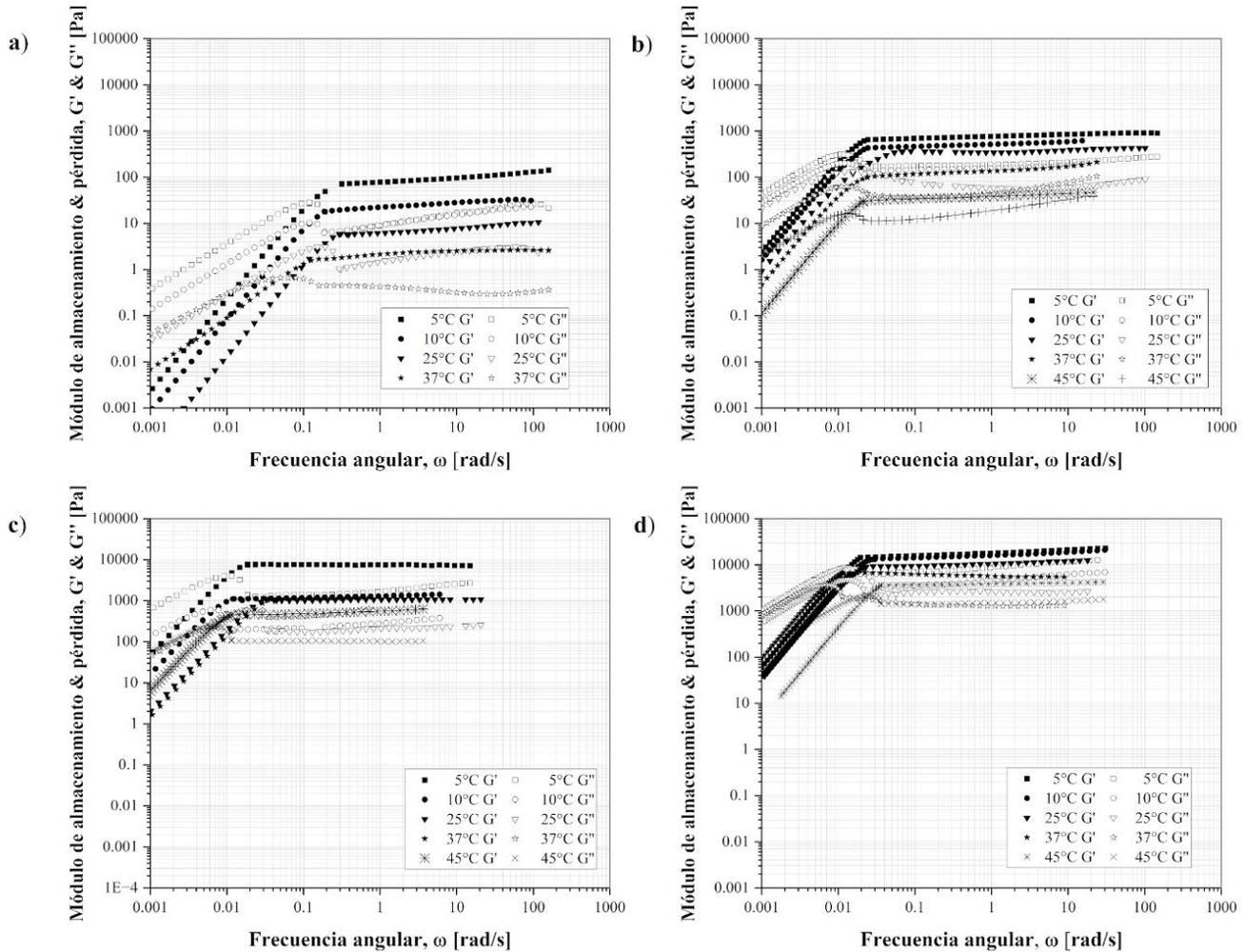


Figura 3. Curvas isotérmicas de la prueba SAOS para  $\kappa$ -carragenina a 5, 10, 25, 37 y 45 °C, con concentraciones de (a) 1 %, (b) 2 %, (c) 3 % y (d) 4 % (p/v).

En la **Figura 4**, se presentan los resultados comparativos entre los datos obtenidos experimentalmente y los modelos empleados. Asimismo, en la **Tabla 1** se exponen los parámetros calculados para cada uno de los modelos, encontrando que la ecuación de Arrhenius no describe del todo el desplazamiento del material ( $\kappa$ -carragenina) (Balogun *et al.*, 2021; Maiti, 2016; Meneses *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2021).

El modelo WLF y Arrhenius son fundamentales para comprender las propiedades viscoelásticas de la  $\kappa$ -carragenina a diferentes temperaturas y concentraciones. Esto permite la

extrapolación de datos reológicos a condiciones no medidas, siendo la ecuación WLF la que mejor se ajusta a los datos para obtener el factor  $a_T$ .

La **Figura 5** muestra la curva maestra obtenida con el principio de TTS, lo que permite ampliar el rango de tiempo (frecuencias) hasta 6 décadas logarítmicas, reduciendo las limitaciones de los reómetros comerciales, los cuales estiman la respuesta del comportamiento reológico de este tipo de biomateriales (TRS) con el sistema reométrico empleado únicamente a 4 décadas.

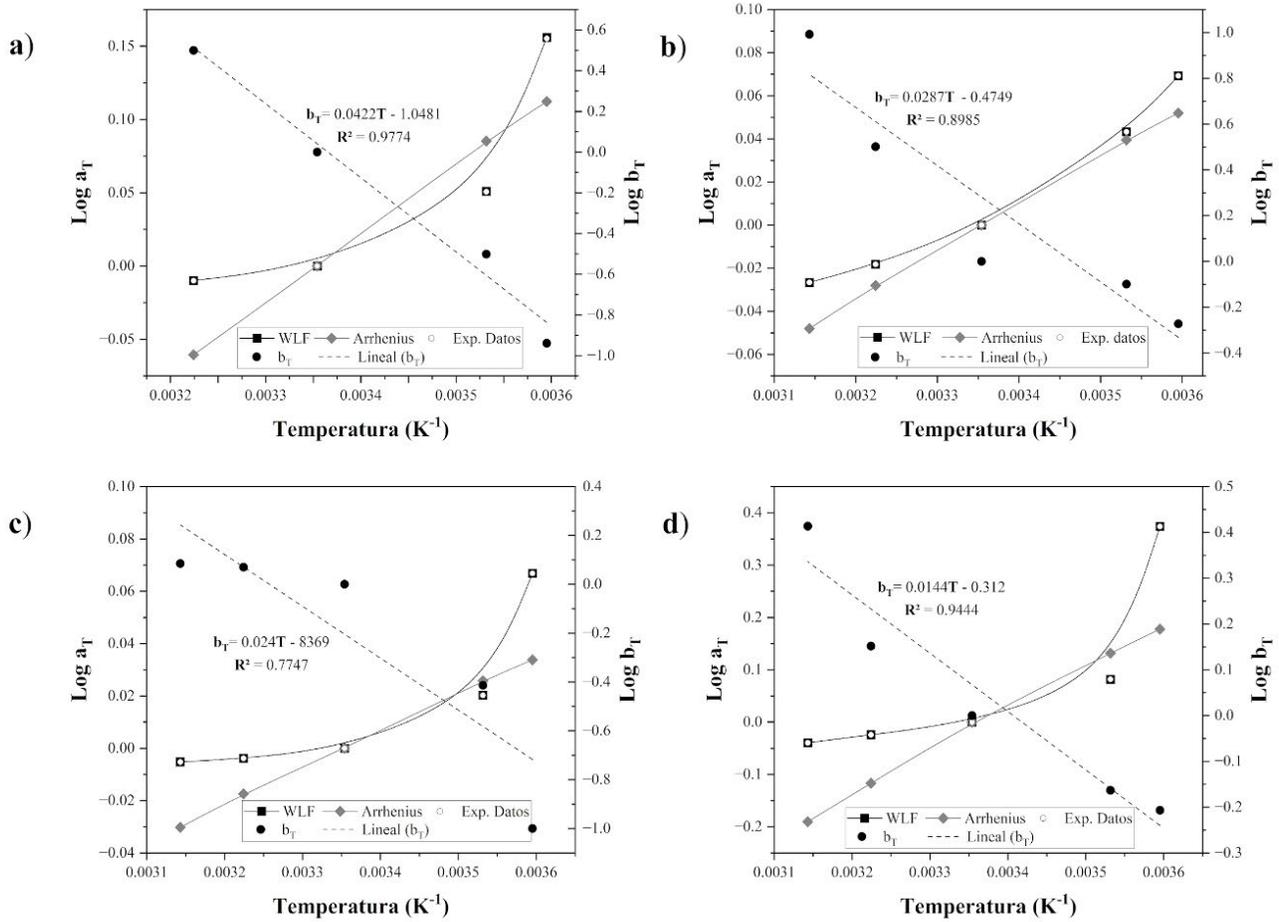


Figura 4. Desplazamiento de los factores  $a_T$  y  $b_T$  con predicciones de los modelos WLF vs Arrhenius.

Concentración %, (p/p)	Arrhenius			WLF		
	Ea (kJ/mol)	SE	C1	C2 (K)	SE	
1	8.58	314	0.030	23.85	$1.11 \times 10^{-3}$	
2	4.10	167.4	0.086	44.97	$1.46 \times 10^{-4}$	
3	2.70	350.3	0.011	23.38	$1.08 \times 10^{-3}$	
4	19.45	238.5	0.24	32.83	$4.36 \times 10^{-4}$	

Tabla 1. Parámetros de los modelos

En la *kappa*-carragenina (por ser un material TRS) puede aplicarse también el principio de TTSC, que incorpora la variación de la concentración. Esto permite ampliar aún más la ventana del comportamiento mecánico. En este sentido, siguiendo la misma metodología de TTS (incluyendo el factor de desplazamiento,

ahora, de la concentración) se construyó una curva maestra de maestra Tiempo-Temperatura-Concentración para la *kappa*-carragenina (Figura 6). Lo que incrementa aún más la ventana de observación hasta 9 décadas (Balogun *et al.*, 2021).

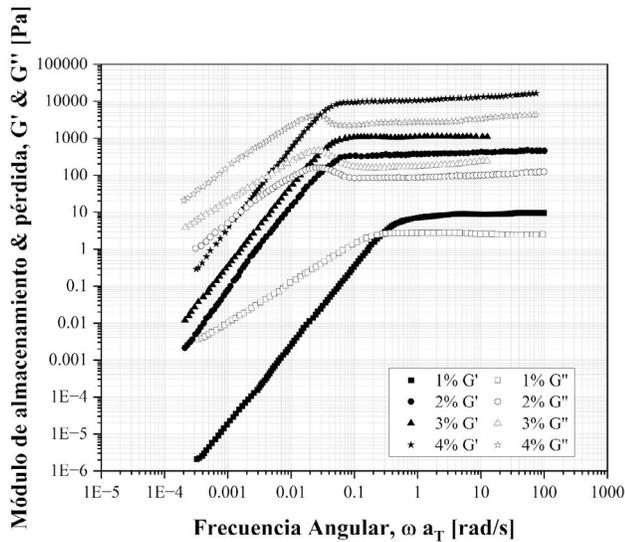


Figura 5. Curvas maestras correspondientes a concentraciones de 1, 2, 3 y 4 % (p/v) de *kappa*-carragenina a una temperatura de referencia de 25 °C,  $I = 0.12$  mM.

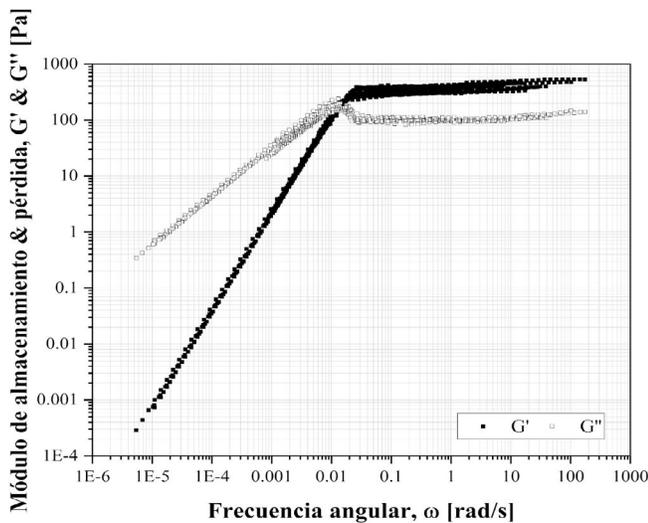


Figura 6. Curva maestra construida a partir de la superposición de Tiempo-Temperatura-Concentración (TTCS) de *kappa*-carragenina a una temperatura de referencia y concentración de 25 °C y 2 % (p/v).

## La importancia de las curvas maestras en sistemas gelantes

La *kappa*-carragenina es un biomaterial que se ha consolidado como un ingrediente fundamental a nivel industrial debido a sus excepcionales propiedades reológicas y su versatilidad en la formulación de productos. Asimismo, su capacidad de formar geles termorreversibles es crucial para mejorar

la textura y estabilidad de productos en la industria alimenticia, cosmética, entre otras. Las técnicas analíticas, como la superposición tiempo-temperatura y tiempo-temperatura-concentración han permitido un avance notable en la comprensión del comportamiento reológico para este biopolímero.

Las propiedades reológicas de sistemas gelantes (por ejemplo, la *kappa*-carragenina) son de vital importancia para el diseño de equipos de proceso y en la formulación de nuevos productos. Por lo que, emplear el principio de TTSC para obtener curvas maestras en este tipo de biomateriales (TRS) permite extender el rango de observación de la respuesta reológica (módulo elástico,  $G'$  y módulo viscoso,  $G''$ ) a frecuencias no accesibles experimentalmente y reducir el tiempo de experimentación en el laboratorio. Además, representan una alternativa interesante e innovadora para la estimación del comportamiento reológico durante diferentes tiempos de almacenamiento y/o condiciones de proceso en la industria química, ampliando la ventana de observación de 4 a 9 décadas logarítmicas respecto a los resultados reométricos convencionales.

## Conclusión

La aplicación del principio de superposición tiempo-temperatura-concentración en la elaboración de curvas maestras proporciona un enfoque técnico y robusto para entender y predecir su comportamiento reológico de este tipo de biomateriales (TRS), lo que resulta fundamental para la optimización de formulaciones en la industria, ya que no solo permiten un diseño más eficiente de productos, sino que mejora la funcionalidad de la *kappa*-carragenina en aplicaciones industriales.

## Referencias

1. Agostinho, D.A., Paninho, A.I., Cordeiro, T., Nunes, A.V., Fonseca, I.M., Pereira, C., Matias, A., Ventura, M.G., Properties of  $\kappa$ -carrageenan aerogels prepared by using different dissolution media and its application as drug delivery systems. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 253, 123290.
2. Ahmed, J., 2017. Time-temperature superposition principle and its application to biopolymer and food rheology, In *Advances in food rheology and its applications*. Elsevier, pp. 209-241.
3. Balogun, A., Lazarenko, D., Khabaz, F., Khare, R., Extending the timescale of molecular simulations by using time-temperature superposition: Rheology of ionic liquids. *Soft Matter*, 2021, 17(30), 7210-7220.
3. Chambon, F., Winter, H.H., Stopping of crosslinking reaction in a PDMS polymer at the gel point. *Polymer Bulletin*, 1985, 13, 499-503.
4. Dorléans, V., Delille, R., Notta-Cuvier, D., Lauro, F., Michau, E., Time-temperature superposition in viscoelasticity and viscoplasticity for thermoplastics. *Polymer Testing*, 2021, 101.
5. Ferry, J.D., *Viscoelastic properties of polymers*. 1980, John Wiley & Sons.
6. Jiang, S., Ma, Y., Wang, Y., Wang, R., Zeng, M., Effect of  $\kappa$ -carrageenan on the gelation properties of oyster protein. *Food Chemistry*, 2022, 382, 132329.
7. Maiti, A., A geometry-based approach to determining time-temperature superposition shifts in aging experiments. *Rheologica Acta*, 2016, 55, 83-90.
8. Medina-Torres, L., Nuñez-Ramirez, D.M., Cabrales-Gonzalez, A.M., Manero, O., Master curves obtained by time-temperature-concentration double superposition of the  $\kappa$ -carrageenan gelling biopolymer. *Journal of Food Process Engineering*, 2024, 47(8), e14724.
9. Meneses, A., Naya, S., Francisco-Fernández, M., López-Beciro, J., Gracia-Fernández, C., Tarrío-Saavedra, J., TTS package: Computational tools for the application of the Time Temperature Superposition principle. *Heliyon*, 2023, 9(5).
10. Pacheco-Quito, E.-M., Ruiz-Caro, R., Veiga, M.-D., Carrageenan: drug delivery systems and other biomedical applications. *Marine Drugs*, 2020, 18(11), 583.
11. Russo Spena, S., Grizzuti, N., Tammaro, D., Linking processing parameters and rheology to optimize additive manufacturing of  $\kappa$ -carrageenan gel systems. *Gels*, 2022, 8(8), 493.
12. Sangeetha, P., Selvakumari, T., Selvasekarapandian, S., Sri-kumar, S., Manjuladevi, R., Mahalakshmi, M., Preparation and characterization of biopolymer  $\kappa$ -carrageenan with  $MgCl_2$  and its application to electrochemical devices. *Ionics*, 2020, 26(1), 233-244.
13. Sabbagh, F., Kiarostami, K., Khatir, N. M., Rezaia, S., Muhammad, I. I., & Hosseini, F. (2021). Effect of zinc content on structural, functional, morphological, and thermal properties of kappa-carrageenan/NaCMC nanocomposites. *Polymer Testing*, 93. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106922>
14. Tang, M. xue, Lei, Y. chen, Wang, Y., Li, D., & Wang, L. jun. (2021). Rheological and structural properties of sodium caseinate as influenced by locust bean gum and  $\kappa$ -carrageenan. *Food Hydrocolloids*, 112(August 2020), 106251. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106251>
15. Yin, Y., Huang, W., Lv, J., Ma, X., Yan, J., Unified construction of dynamic rheological master curve of asphalts and asphalt mixtures. *International Journal of Civil Engineering*, 2018, 16, 1057-1067.
16. Zhang, J., Su, W., Liu, Y., Gong, J., Xi, Z., Zhang, J., Wang, Q., Xie, H., Laboratory investigation on the microstructure and performance of SBS modified epoxy asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 2021, 270.
17. Zhu, Y.-d., Wang, Y., Li, D., Wang, L.-j., Effect of hydrothermal treatment on linear and nonlinear rheological properties of highland barley gels. *LWT*, 2020, 119, 108868.

# Cúmulos metálicos, ¿cómo identificar su estructura más estable?

Patricio Limón<sup>1</sup>, Rodolfo Gómez Balderas<sup>1</sup>, Estrella Ramos<sup>2</sup>

1. Laboratorio de Físicoquímica Analítica, Unidad de Investigación Multidisciplinaria, Facultad de Estudios Superiores-Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli, 54714, Estado de México, México.

2. Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, Ciudad de México, México.

[patch579@comunidad.unam.mx](mailto:patch579@comunidad.unam.mx), [rodolfo.gomez@unam.mx](mailto:rodolfo.gomez@unam.mx)

## Resumen

El estudio de cúmulos de átomos de metales de transición se centra en la formación de pequeñas agrupaciones de átomos metálicos que presentan propiedades únicas y distintas a las del sólido, o a las de sus átomos individuales. Estos cúmulos, definidos como compuestos moleculares con tres o más átomos metálicos, son cruciales en procesos como la catálisis, donde pueden acelerar reacciones químicas importantes para la industria y el medio ambiente. Para comprender mejor sus propiedades, se emplean herramientas de modelado molecular, y los algoritmos genéticos se utilizan para optimizar la configuración de estos cúmulos, buscando la geometría de mínima energía a través de un proceso inspirado en la evolución natural. Este enfoque es fundamental para explorar nuevas aplicaciones en catálisis y diseño de materiales, dado el crecimiento exponencial de posibles configuraciones a medida que aumenta el número de átomos en el cúmulo.

## Introducción

Ya sabemos que los átomos metálicos pueden formar estructuras tridimensionales infinitas,

a las que llamamos metales, caracterizadas por sus potentes enlaces... ¿Alguna vez te has preguntado si estos elementos pueden formar moléculas solo entre unos pocos átomos? ¿Cuál será la forma que tomen a medida que se agrupan?... La respuesta abre un mundo de posibilidades en las ciencias químicas y de materiales.

Desde tiempos prehistóricos, los metales han sido fundamentales en el desarrollo de la humanidad. El cobre y el hierro fueron algunos de los primeros metales utilizados para fabricar herramientas y armas, lo que revolucionó la vida cotidiana. A medida que avanzaban las técnicas de procesamiento de metales se descubrió que los metales eran capaces de formar estructuras muy pequeñas, a las que se les llamó cúmulos metálicos: pequeños grupos de átomos que exhiben características únicas, que no corresponden a aquellas de los átomos individuales o a las de materiales macroscópicos.

*Cúmulo metálico es un compuesto molecular que contiene tres o más metales en una disposición "cerrada", mantenidos*

*juntos por enlaces metal-metal. En esta definición podemos observar que se pone de relieve la importancia de las interacciones entre los metales y las características estructurales únicas de estas configuraciones cerradas. Hoy en día, se consideran cúmulos metálicos incluso aquellos compuestos que contienen desde dos átomos de metal y también aquellos que presentan varios átomos de metal unidos por ligantes, aun cuando no presenten enlaces metal-metal, así como pequeñas partículas metálicas [1].*

Al variar el tamaño de estos cúmulos, se alteran muchas de sus propiedades, tanto físicas como químicas, lo que abre nuevas oportunidades en aplicaciones tecnológicas.

A mediados del siglo XX, la ciencia de los cúmulos metálicos experimentó un avance significativo gracias al trabajo de F. Albert Cotton y sus colaboradores. En 1965 descubrieron que los metales de transición podían agruparse en estructuras complejas con propiedades de enlace excepcionales. Este descubrimiento marcó un nuevo camino para comprender el comportamiento de los metales a nivel molecular [2].

*Un catalizador es un material que acelera una reacción química sin que se consuma en el proceso. Se ha encontrado que uno de los efectos más interesantes de los cúmulos metálicos es su habilidad para modificar la velocidad de reacciones químicas de interés ambiental, por ejemplo, hacer que un hidrocarburo se oxide y se convierta en CO<sub>2</sub> y agua.*

Analizar las propiedades estructurales, electrónicas y magnéticas de los cúmulos de átomos de metales de transición es de gran relevancia en la actualidad [3, 4, 5]. Una de las aplica-

ciones más frecuentes de estos cúmulos es su papel como catalizadores en la captación de moléculas contaminantes, como el CO<sub>2</sub>, y en algunos casos altamente tóxicas, como el CO [6]. Esta característica convierte a los cúmulos metálicos en materiales clave en la búsqueda de soluciones sostenibles para los desafíos ambientales que enfrentamos en el mundo moderno

La activación y eventual rompimiento del enlace C-O tiene aplicación en la limpieza del aire y reutilización de los productos del proceso de combustión. Esta activación se manifiesta en el alargamiento de la longitud del enlace C-O, lo cual se traduce en un corrimiento al rojo de su frecuencia de vibración. Este cambio indica el debilitamiento del enlace, es decir, ¡su activación! La activación y eventual rompimiento del enlace C-O tiene aplicación en la limpieza del aire y reutilización de los productos de combustión. Por otro lado, también se han estudiado diferentes tipos de cúmulos organometálicos como análogos de los sitios activos de proteínas con metales en su estructura [7]. En el área de la nanotecnología se han utilizado como semillas en síntesis de nanotubos y otras nanoestructuras de carbono [8, 9].

*La activación de un enlace provoca que una molécula se vuelva más reactiva, facilitando su ruptura o transformación durante una reacción química. Esto puede lograrse mediante la introducción de un catalizador, que ayuda a debilitar el enlace, o mediante la adición de energía (como calor o luz). La activación permite que las moléculas reaccionen más fácilmente, lo que es crucial en muchos procesos químicos.*

Los cúmulos metálicos se pueden sintetizar y caracterizar experimentalmente en un labo-

ratorio utilizando técnicas como la difracción de electrones o la espectroscopía de masas. La caracterización teórica, mediante el uso de simulaciones moleculares complementa los experimentos y nos ayuda a predecir tanto la forma como la energía más estable, modelando las interacciones atómicas y electrónicas. Al hacerlo, se pueden explorar diversas configuraciones y estructuras, permitiendo observar cómo pequeñas variaciones en la composición o en la disposición de los átomos pueden afectar sus propiedades físicas y químicas de los cúmulos.

Para el estudio teórico de cúmulos de metales de transición, existen aproximaciones que van desde la mecánica o la dinámica molecular clásicas hasta la mecánica cuántica. Dentro de los métodos cuánticos destaca la Teoría de los Funcionales de la Densidad para resolver la estructura electrónica y encontrar la energía total del cúmulo [10] para un conjunto de posiciones atómicas. Claramente, para una fórmula mínima se pueden tener múltiples arreglos espaciales. Por ejemplo, el cúmulo  $\text{Au}_3\text{Cu}$ , con 3 átomos de oro y uno de cobre, puede ordenarse en una dimensión linealmente, en dos dimensiones como un cuadrado, o en tres dimensiones como un tetraedro, aunque existen otros arreglos, por supuesto (Figura 1). Por otro lado, al aumentar la cantidad de átomos presentes en los sistemas, y con ello el número de electrones, también se incrementa el número de arreglos electrónicos de cada cúmulo [11].

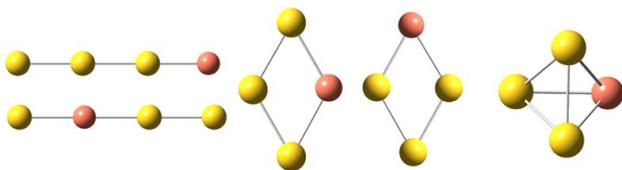


Figura 1. Distintas geometrías que puede adoptar el cúmulo  $\text{Au}_3\text{Cu}$

En la medida que crece el número de átomos en un cúmulo, el número de conformaciones posibles también crece, y nos enfrentamos al enorme reto de predecir cuál será la geometría de menor energía. Para enfrentar este reto, una de las herramientas utilizadas son los algoritmos genéticos. Constituye una estrategia de optimización inspirada en un proceso de selección natural. En el contexto de la generación de cúmulos metálicos, este tipo de algoritmo se utiliza para encontrar configuraciones óptimas de átomos que minimicen la energía y maximicen la estabilidad de un cúmulo.

### La superficie de energía potencial

*Es importante destacar que un mismo número de átomos en un cúmulo puede adoptar diferentes geometrías y configuraciones electrónicas. Cada arreglo geométrico representa un punto de una superficie de energía potencial. Energía almacenada en el sistema debido a las interacciones entre núcleos atómicos y sus posiciones relativas. Cada configuración electrónica está asociada a diferentes niveles de energía, por lo que existe una superficie para cada una de ellas. Para buscar el estado de mínima energía es fundamental explorar todos los arreglos posibles (geométricos y electrónicos) que conduzcan al estado óptimo.*

La energía de cada isómero geométrico con una determinada configuración electrónica es un punto en la superficie de energía potencial de ese isómero. Es interesante destacar que los cúmulos metálicos presentan otro nivel de complejidad: un mismo número de átomos con el mismo arreglo geométrico puede distribuir sus electrones en los niveles de energía de diferentes maneras. Esta multiplicidad de configuraciones electrónicas obliga a explorar

todas las posibilidades cuando se pretende encontrar el cúmulo de menor energía [12]. Esta búsqueda es muy complicada, debido a que hay un número infinito de puntos sobre cada superficie, algunos de los puntos relevantes se muestran en la Figura 2 [13], la proyección de la superficie sobre el plano XY permite conectar los puntos 4 y 5, siguiendo la trayectoria 2. En la actualidad el problema se resuelve “artesanalmente”, lo que no garantiza que el mínimo obtenido sea el mínimo global. Encontrar al sistema que por sus propiedades estructurales y electrónicas tenga mínima energía es un problema de optimización que debe resolverse de manera previa al análisis de las propiedades químicas del cúmulo.

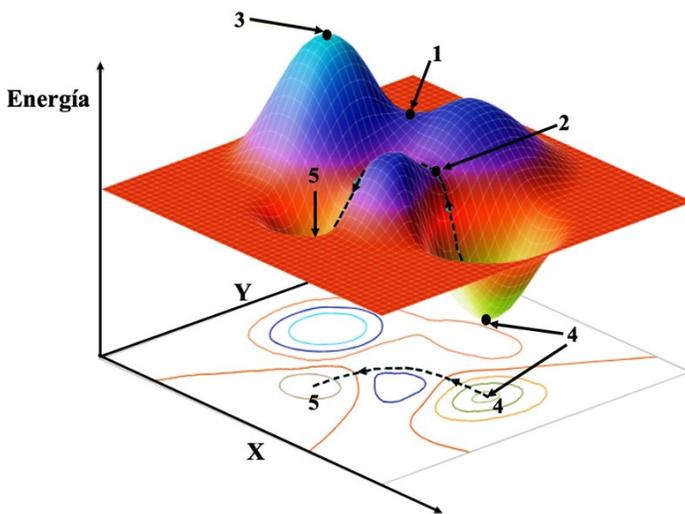


Figura 2. Topología de una superficie de energía potencial: 1) Punto de silla, 2) camino de reacción que conecta los mínimos 4 y 5, 3) punto máximo de energía y 4) mínimo absoluto de energía, 5) mínimo local de energía, Michaelian, K. [13]. La proyección de la superficie sobre el plano XY muestra la conexión entre los puntos 4 y 5, correspondientes a la trayectoria 2.

Para identificar las configuraciones óptimas de átomos y electrones que minimicen la energía y maximicen la estabilidad del cúmulo existen diferentes algoritmos. A continuación, se explicará brevemente cómo se clasifican y en qué consisten.

## Algoritmos heurísticos y metaheurísticos

Actualmente, la heurística es la disciplina que estudia el descubrimiento y la resolución de problemas, basándose en intuición, experiencia y conocimiento, y se utiliza en diversas disciplinas. En optimización, los algoritmos heurísticos usan estas técnicas para encontrar soluciones aproximadas a la óptima en un tiempo razonable [14]. Algunos ejemplos comunes de algoritmos heurísticos incluyen búsquedas locales, que comienzan en una solución inicial, realizan pequeños cambios iterativos y pueden utilizar experiencias pasadas para guiar la búsqueda.

Por otro lado, los algoritmos metaheurísticos son heurísticos de alto nivel que guían la búsqueda en el espacio de soluciones. Son eficaces cuando los heurísticos clásicos fallan [15]. En general, cuando hablamos de algoritmos de solución para problemas de optimización no continua, las palabras heurística y metaheurística se pueden considerar equivalentes. Optimización no continua, o combinatoria se refiere a la búsqueda de la mejor solución entre un conjunto finito de posibles combinaciones. Algunos ejemplos de metaheurísticos son: a) Recocido Simulado que se inspira en el proceso físico de enfriamiento de un material; b) Búsqueda de Vecindario Variable, que alterna entre diferentes estructuras de vecindario para explorar el espacio de soluciones, o c) Búsqueda Tabú, que mantiene una lista de movimientos prohibidos para evitar ciclos en la búsqueda. Otro ejemplo muy útil de este tipo de metaheurísticos son los Algoritmos Basados en la Naturaleza, ABN.

A continuación, se describen brevemente estos algoritmos:

**I) Algoritmos Basados en la Naturaleza**  
Se tratan de técnicas computacionales que se inspiran en procesos y comportamientos observados en la naturaleza [16]. Algunos son:

- a) **Algoritmos evolutivos:** basados en los principios de la evolución biológica, utilizan procesos de selección, reproducción, cruce y/o mutación.
- b) **Optimización por Enjambre de Partículas:** se basa en el comportamiento colectivo de colonias de abejas, pájaros o peces que se mueven hacia la mejor solución, siguiendo experiencias individuales y colectivas.
- c) **Algoritmos Hormiga.** Las hormigas construyen soluciones incrementales y utilizan feromonas para comunicarse y compartir información sobre la calidad de las soluciones, encontrando el camino más corto entre el hormiguero y la comida.
- d) **Computación Celular:** se basa en la interacción local de entidades computacionales llamadas células (inspiradas en las células biológicas) para realizar cálculos complejos.
- e) **Algoritmos de Virus de Computadora:** que optimizan soluciones mediante la modificación y combinación de soluciones existentes para crear nuevas y potencialmente mejores soluciones.

Hay muchos más ABN que se han desarrollado para abordar problemas específicos en diversas disciplinas. Estos algoritmos ofrecen una perspectiva innovadora al imitar los procesos naturales que han evolucionado durante miles de millones de años.

Finalmente, de entre estos ABN, cabe destacar a los denominados:

- f) **Algoritmos Genéticos, AG.** Se inspiran en el proceso de selección natural de la teoría de la evolución de Darwin. Utilizan operadores genéticos de selección, cruce (*crossover*) y mutación para crear soluciones y mejorar gradualmente esas soluciones a lo largo de varias generaciones. Fueron propuestos por John Holland en la década de 1960 [17]. Son aplicados a una amplia gama de problemas, desde matemáticos, hasta de diseño en ingeniería u optimización de parámetros en *machine learning*. En México ya se han diseñado este tipo de algoritmos para la optimización de estructuras químicas dando muy buenos resultados como *Global Optimization of Molecular Systems* (GLOMOS) [18] o *Mexican Enhanced Genetic Algorithm* (MEGA) [19]; ambos utilizan DFT, pero el último se ha utilizado para optimizar cúmulos metálicos (como cúmulos de átomos de oro).

En la Figura 3 se muestra un diagrama de flujo que representa cómo funcionaría un AG para la optimización de la geometría de cúmulos metálicos. Una vez que se ha encontrado una

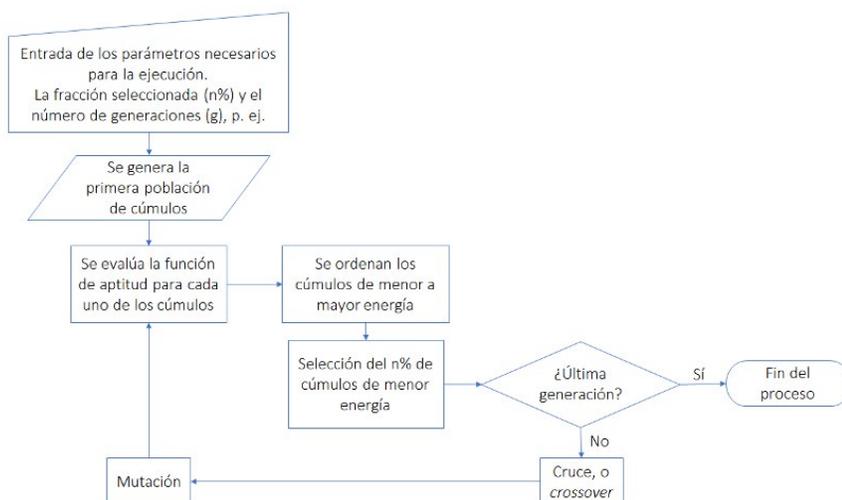


Figura 3. Diagrama de flujo de un algoritmo genético. El porcentaje de selección (n%) y número de generaciones (g) son establecidas por el usuario

geometría con energía cercana al mínimo es posible reoptimizar con un nivel más alto de teoría y así hacer una descripción más fiable de sus propiedades químicas.

Pasos que ilustran un algoritmo genético para la optimización de cúmulos:

1. Para dar inicio al código es importante ajustar los parámetros del algoritmo, como el tamaño de población, el tamaño de la caja, la distancia mínima interatómica, la función aptitud, el número de generaciones y las tasas de selección, cruce y mutación. Al final se queda con los dos individuos de mínima energía. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de una primera población de 25 individuos del sistema  $\text{Au}_3\text{Cu}$  y los dos seleccionados de menor energía. Esto después de seleccionar 5 primeros padres que, al aplicar los operadores de cruce y mutación, dan lugar a una siguiente generación de 20 hijos y después haciendo las generaciones necesarias para obtener los individuos con energías mínimas o cercanas a la óptima.

2. Población de inicio: la diversidad es crucial para la convergencia del algoritmo. Para cúmulos metálicos, esta población se genera con un determinado número de cúmulos con coordenadas aleatorias (Figura 4), cuidando variables como el tamaño de la caja en donde se construye el cúmulo, y las distancias interatómicas, para evitar el traslape de diferentes átomos.

3. Para la selección de los cúmulos que se reproducirán y formarán la siguiente generación se define una función aptitud, su energía total en este caso (Figura 3). Se realiza la comparación de las energías de cada uno de los cúmulos en la población y se seleccionan aquellos con energía  $E_i < E$ . Donde  $E_i$  es la energía de cada cúmulo perteneciente al  $n\%$  seleccionado y  $E$  representa la energía del primer cúmulo no seleccionado.

4. Cruce, o *Crossover*: aplica operadores de cruce para combinar características, el “genoma” de dos padres seleccionados y crear descendientes. Para el caso de estructuras atómicas hay diversas opciones. Un ejemplo útil es el cruce basado en topología, que es el usado durante nuestro ejemplo (Figura 4), intercambia subestructuras completas, o fragmentos manteniendo su validez química. Otros operadores que también pueden seleccionarse son: a) de cruce de punto, que selecciona uno, o dos puntos de cruce en las cadenas estructurales y se intercambian subcadenas para generar descendientes, b) el cruce de árbol, que representa a los cúmulos como árboles y realiza cruces en los nodos del árbol, o c) el cruce de grafos moleculares, en donde se utilizan grafos que representan a las estructuras moleculares.

5. Mutación: introduce pequeños cambios en los individuos para mantener la diversidad y evitar la convergencia prematura. También existen varias opciones que pueden seleccionarse para generar diversidad en la topología de las estructuras atómicas, en este caso se puede seleccionar un solo criterio de mutación o combinar diferentes para añadir mayor diversidad a la exploración: a) mutación de un gen (usado durante nuestro ejemplo, debido a su simplicidad), en donde los genes son las coordenadas moleculares que se modifican aleatoriamente, según un factor dado al iniciar el código; b) la mutación de rotación, que rota en un determinado ángulo uno, o varios fragmentos de la estructura; c) la mutación de inversión, que invierte el orden de un segmento de coordenadas, o d) la mutación de ajuste de longitudes de enlace, que modifica las distancias entre los enlaces de los átomos. En todos los casos la idea es ir generando isómeros de menor energía en cada iteración.

6. Criterio de Parada: puede ser un número fijo de generaciones o alcanzar un valor de

energía. En nuestro ejemplo (Figura 4) como criterio de parada se usó un número fijo de 5 generaciones establecidas por el usuario.

### A manera de resumen

Las múltiples conformaciones y arreglos electrónicos de los cúmulos metálicos originan una gran cantidad de aplicaciones, lo que ha hecho que el estudio y descripción de sus propiedades estructurales y electrónicas re-

sulte de gran interés. Para poder describir las propiedades de los cúmulos metálicos que más nos encontraremos en la naturaleza con mayor frecuencia es indispensable explorar la superficie de energía potencial y hallar aquella estructura que corresponda a un mínimo global de energía. Hasta este momento, este problema se ha resuelto con ayuda de evidencia experimental e "intuición química", lo que no garantiza que el mínimo obtenido sea

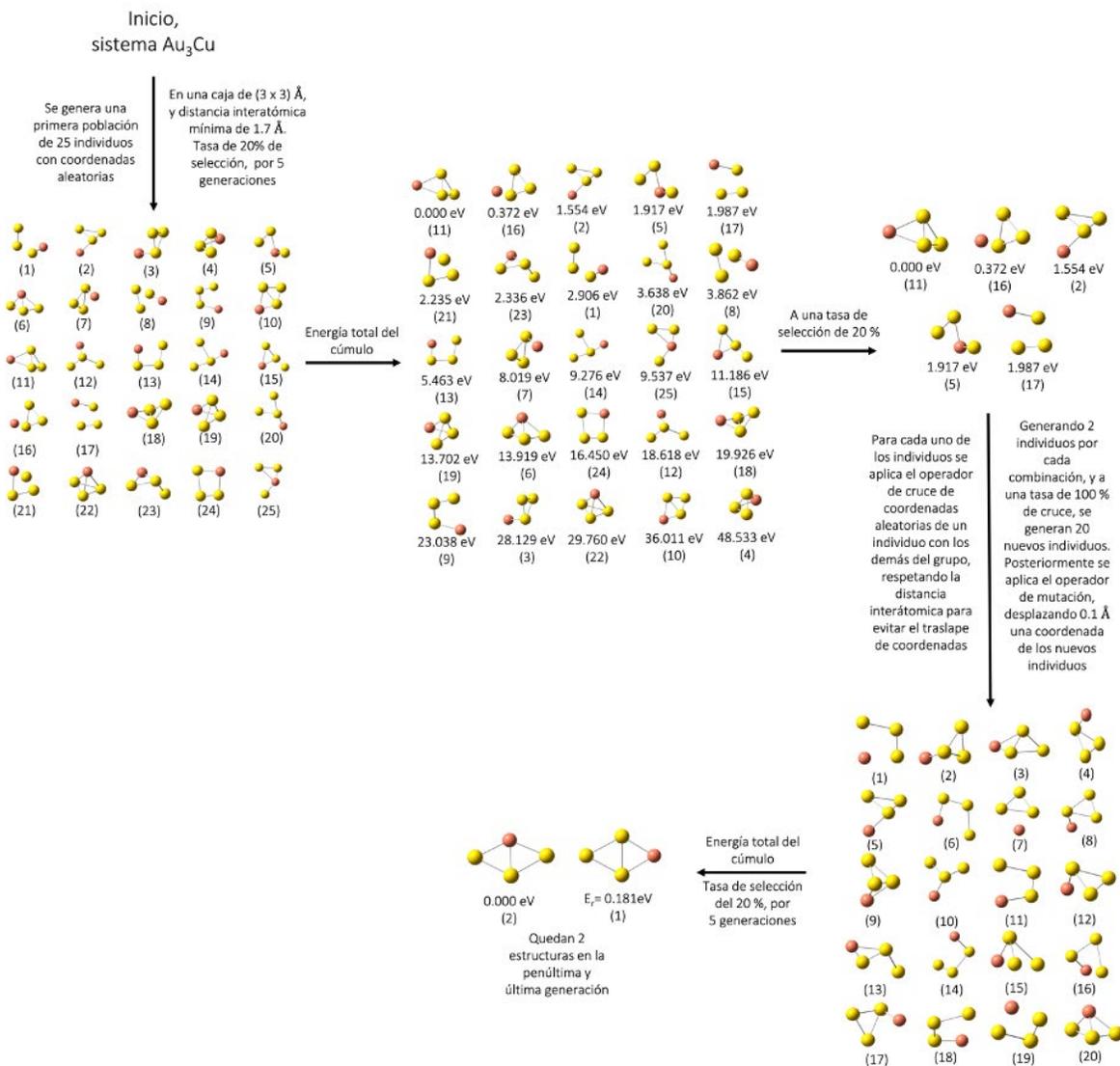


Figura 4. Se genera aleatoriamente una primera población de 25 individuos, posteriormente se aplica la función de aptitud y se obtiene la generación de padres, desde los que se comenzará la exploración. Después de 5 generaciones se pueden obtener soluciones cercanas a la óptima. Energías relativas respecto al mínimo en eV.

el mínimo global. En Química Teórica y Computacional es cada vez más común el uso de algoritmos metaheurísticos para encontrar la estructura de los cúmulos. Los algoritmos genéticos, en compañía de programas de computadora especializados en química computacional, representan una gran ventaja para explorar la superficie de energía potencial. Usando un algoritmo genético, a partir de una población de 25 individuos ( $\text{Au}_3\text{Cu}$ ) generados con coordenadas aleatorias, se obtuvieron 2 conformaciones con energía mínima en la cuarta iteración que, al ser sometidos a una segunda optimización, arrojan conformaciones muy cercanas al mínimo global.

## Agradecimientos

Se agradece a CONAHCyT por la beca otorgada para la realización de la estancia posdoctoral del Dr. Patricio Limón, CVU: 480569. Rodolfo Gómez agradece el apoyo del proyecto PAPIIT IN222224, DGAPA UNAM, a DGTIC, UNAM, por el tiempo de cómputo otorgado a través del proyecto LANCAD-UNAM-DGTIC-058 y del Programa de Cátedras de Investigación de la FES Cuautitlán, UNAM clave CI2463. Estrella Ramos agradece el apoyo del proyecto DGAPA-UNAM PAPIIT número IG100320 y del proyecto DGA-PA-UNAM PAPIME número PE109424 y expresa su gratitud a Oralia L. Jiménez, María Teresa Vázquez, Alejandro Pompa, Celic Martínez y Caín González por su asistencia técnica.

## Referencias

[1] J. B. Keister, "Reactivity of methylidyne ligands on trinuclear clusters of group 8 metals" *Polyhedron*. 7 (1988) Issues 10–11, 847–858.  
[2] J. F. Berry, and C. C. Lu, "Metal–Metal Bonds: From Fundamentals to Applications" *Inorganic Chemistry*. 56 (2017) Issue 14, 7577–7581.  
[3] M. Castro, "The role of the Jahn–Teller distortions on the structural, binding, and magnetic properties of small Fe<sub>n</sub> clusters,  $n \leq 7$ " *Int. J. Quant. Chem.* 64 (1997) 223–230.  
[4] Z. Luo, "Advances in Naked Metal Clusters for Catalysis" *Chem. Phys. Chem.* Volume 25, Issue 10 (2024) e202300715.  
[5] A. Kulkarni, R. J. Lobo–Lapidus, B. C. Gates, "Metal clusters

on supports: synthesis, structure, reactivity, and catalytic properties" *Chem. Commun.* 46 (2010) 5997–6015.  
[6] P. Limon, A. Miralrio, M. Castro, "Adsorption and dissociation of carbon monoxide on iron and iron-carbon clusters:  $\text{Fe}_n^+ \text{CO}$  and  $\text{Fe}_n \text{C}^+ \text{CO}$ ,  $n=4$  and 7. A theoretical study" *Comput. Theor. Chem.* 1129 (2018) 37–47.  
[7] P. Venkateswara Rao and R. H. Holm "Synthetic Analogues of the Active Sites of Iron–Sulfur Proteins" *Chemical Reviews*. 104 (2003) Issue 2, No. 2, 527–560.  
[8] A.J. Page, H. Yamane, Y. Ohta, S. Irle, K. Morokuma, "QM/MD simulation of SWNT nucleation on transition-metal carbide nanoparticles" *J Am Chem Soc.* 132 (2010) 15699–15707.  
[9] T. Guo, P. Nikolaev, A. Thess, D.T. Colbert, R.E. Smalley, "Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization" *Chem. Phys. Lett.* 243 (1995) 49–54.  
[10] M. Orío, D.A. Pantazis, F. Neese, "Density functional theory" *Photosynth. Res.* 102 (2009) 443–453.  
[11] L.R. Maurer, M. Bursch, S. Grimme, A. Hansen, "Assessing Density Functional Theory for Chemically Relevant Open-Shell Transition Metal Reactions" *J. Chem. Theory. Comput.* 17 (2021) 6134–6151.  
[12] S. Sur, E. Quintas-Sánchez, S.A. Ndengué, R. Dawes, "Development of a potential energy surface for the O<sub>3</sub>–Ar system: rovibrational states of the complex" *Physical Chemistry Chemical Physics*. 21 (2019) 9168–9180.  
[13] K. Michaelian, "The Non-Equilibrium Thermodynamics of Natural Selection: From Molecules to the Biosphere" *Entropy*. 25 (2023) 1059.  
[14] R.L. Rardin, R. Uzsoy, "Experimental evaluation of heuristic optimization algorithms: A tutorial" *Journal of Heuristics*. 7 (2001) 261–304.  
[15] M. Abdel-Basset, L. Abdel-Fatah, A.K. Sangaiyah, "Meta-heuristic Algorithms: A Comprehensive Review" *Computational Intelligence for Multimedia Big Data on the Cloud with Engineering Applications*. (2018) 185–231.  
[16] C.C.W. Chang, T.J. Ding, M.A.S. Bhuiyan, K.C. Chao, M. Ariannejad, H.C. Yian, "Nature-Inspired Optimization Algorithms in Solving Partial Shading Problems: A Systematic Review" *Archives of Computational Methods in Engineering*. 30 (2023) 223–249.  
[17] S. Katoch, S.S. Chauhan, V. Kumar, "A review on genetic algorithm: past, present, and future" *Multimed. Tools. Appl.* 80 (2021) 8091–8126.  
[18] O. Yañez, D. Inostroza, B. Usuga-Acevedo, A. Vázquez-Espinal, R. Pino-Rios, M. Tabilo-Sepulveda, J. Garza, J. Barroso, G. Merino, W. Tiznado, "Evaluation of restricted probabilistic cellular automata on the exploration of the potential energy surface of  $\text{Be}_6\text{B}_{11}^-$ " *Theo. Chem. Acc.* 139 (2020) 1–8.  
[19] J.A. Vargas, F. Buendía, M.R. Beltrán, "New AuN (N = 27–30) Lowest Energy Clusters Obtained by Means of an Improved DFT-Genetic Algorithm Methodology" *Journal of Physical Chemistry C*. 121 (2017) 10982–10991.

# El uso de la luz solar en la decoloración de aguas residuales, sostenibilidad ambiental

Samantha Yadira Pinedo Hernández<sup>1,2</sup>, José Luis García Rivas<sup>2</sup>, Javier Illescas<sup>2</sup>

1. Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), Av. Insurgentes Sur 1582, Alcaldía Benito Juárez, Colonia Crédito Constructor, C.P. 03940 Ciudad de México

2. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, CP 52149. Metepec, Estado de México

[samantha.ph@toluca.tecnm.mx](mailto:samantha.ph@toluca.tecnm.mx)

## Resumen

Una de las emergencias ambientales más graves a las que nos enfrentamos actualmente es la contaminación del agua. La descarga de estos contaminantes en el medio ambiente afecta la salud humana y los ecosistemas acuáticos. La implementación de los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) para el tratamiento de aguas muestran ser realmente beneficiosos, ya que estos ayudan a tratar contaminantes altamente tóxicos, logrando su degradación. El uso de catalizadores como el hierro en los Procesos de Oxidación Parcial (POA) puede ser muy beneficioso; no solo son estables, sino que también pueden regenerarse, lo que reduce la necesidad de reemplazarlos constantemente y disminuye los costos operativos. Además, incorporar energía solar en el proceso mejora la eficiencia energética y hace que el sistema sea más sostenible, al aprovechar una fuente de energía renovable para promover reacciones químicas.

## Palabras clave:

Luz solar, Foto-Fenton, Agua residual textil.

## Introducción

### El problema de los contaminantes del agua por uso humano

El agua es el líquido más importante de nuestro planeta. Es fundamental para la vida. La disponibilidad del agua está disminuyendo en cantidad y calidad (Figura 1).

Sin embargo, solo el 2.5 % de esta agua es agua dulce y este porcentaje se reduce para el agua potable a 0.025 %. Este pequeño porcentaje de agua se utiliza para varios propósitos, entre los que se encuentran los usos agrícola, doméstico e industrial [1]. Todos los procesos vitales de nuestro planeta dependen directa o indirectamente de esta sustancia tan valiosa. Por otro lado, los ríos constituyen la principal fuente de abastecimiento de agua potable para muchas poblaciones humanas, pero su contaminación actual limita su disponibilidad para el desarrollo de la vida, lo que ha derivado en la sobreexplotación de los mantos acuíferos. Estos también han resultado contaminados en el proceso de extracción del agua. La con-

taminación de los cuerpos de agua no solo afecta la calidad del agua, sino que también tiene impactos graves sobre los ecosistemas acuáticos y la salud humana. El hecho de que se viertan 89.2 m<sup>3</sup>/s de aguas contaminadas sin tratamiento cada segundo es una muestra clara de la magnitud del problema [2]. Recientemente, la escasez de recursos hídricos debido al aumento de la contaminación del agua ha llamado mucho la atención. Entre los contaminantes del agua se encuentran los colorantes orgánicos, que generalmente se encuentran en muchos campos industriales como el textil, farmacéutico, cuero, papel, imprenta, alimentos y cosméticos. También, son un tipo de contaminantes complicados para los organismos vivos, por su no biodegradabilidad, toxicidad, recalcitrancia y carcinogenicidad [3]. Estos son drenados directamente a los cuerpos de agua como aguas residuales, lo que finalmente contamina el medio ambiente.

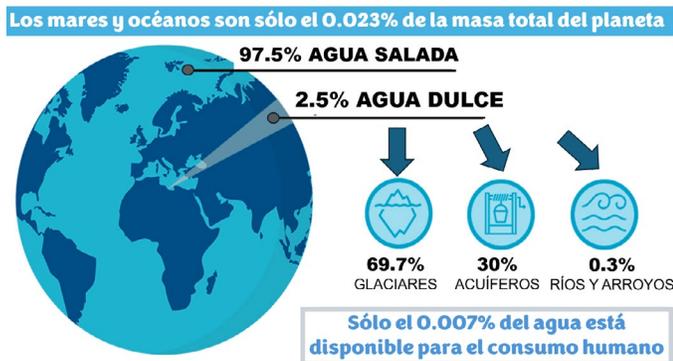


Figura 1. Distribución de agua en el mundo.

## La importancia del tratamiento de aguas residuales

La emergencia ambiental afecta a los tres pilares fundamentales: agua, aire y suelo, pero el agua es particularmente crítica por su rol esencial en la vida. La disminución de la accesibilidad al agua limpia es un problema cada vez más urgente y global, no solo por la contaminación, sino también por la sobreexplotación, el cambio climático y la falta de

gestión adecuada de los recursos hídricos. Por lo tanto, los esfuerzos enfocados al tratamiento de aguas contaminadas han ganado relevancia en todo el mundo como objeto de diversas investigaciones que buscan regresar al agua la calidad que ha perdido por las actividades antropogénicas.

La contaminación de los recursos hídricos debida a los compuestos orgánicos persistentes, tales como los colorantes, representan un desafío considerable para los métodos de tratamiento tradicionales, debido a su alta estabilidad y complejidad molecular. Esta resistencia a la biodegradación no solo dificulta su eliminación, sino que también tiene un impacto directo y negativo en los ecosistemas acuáticos y la salud humana [5]. La descarga de estos contaminantes puede afectar la calidad del agua al bloquear la luz solar, lo que inhibe la fotosíntesis y puede alterar el equilibrio ecológico de los cuerpos de agua [6]. Además de estos efectos directos, la presencia de estos compuestos también puede generar problemas de toxicidad a largo plazo, afectando la fauna acuática y, a través de la cadena alimentaria, a los seres humanos (Figura 2) [1][4]. El hecho de que entre el 10 y el 15 % de los co-



Figura 2. Consecuencias del vertido de aguas residuales a ríos.

lorantes utilizados en la industria sean vertidos al medio ambiente sin tratamiento adecuado resalta la magnitud del problema [7]. La con-

taminación de las aguas es de las mayores preocupaciones que se tiene en la actualidad. La industria textil es uno de los sectores más importantes de la economía mundial; por ejemplo, México es uno de los grandes productores de mezclilla en el mundo. Esta es una de las industrias con mayor consumo de agua, y las aguas residuales que se generan contienen un gran número de contaminantes de diferente naturaleza [8].

Los métodos clásicos de tratamiento a menudo no son eficaces para eliminar los colorantes persistentes de la industria textil, esto se debe a que muchos de estos compuestos tienen estructuras moleculares complejas y una alta estabilidad química, lo que les permite resistir procesos de degradación convencional y permanecer en el medio ambiente por largos períodos de tiempo [5]. Los métodos convencionales utilizados para el tratamiento de aguas residuales son los fisicoquímicos y biológicos, los cuales han demostrado ser efectivos para diversos tipos de contaminantes

orgánicos persistentes [3][9-11]. No obstante, estas tecnologías tienen varios problemas operativos, como la generación de lodos, el ensuciamiento de las membranas y un alto costo operativo. En las últimas décadas se han desarrollado diferentes métodos que han resultado ser muy eficientes y amigables con el medio ambiente para el tratamiento de aguas residuales, tales como los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) [7][12-14].

### Procesos de oxidación avanzada (POA)

Los POA han demostrado su eficiencia para el tratamiento de compuestos orgánicos. Entre las ventajas destacan el uso de reactivos respetuosos con el medio ambiente y que los lodos generados durante el tratamiento se reducen de manera drástica, además se puede aprovechar la radiación solar como fuente de iluminación [15]. Los POA son técnicas de oxidación química que se basan en la formación de radicales hidroxilos ( $\text{OH}\cdot$ ), que son especies altamente reactivas capaces de atacar y des-



Figura 3. Procesos de Oxidación Avanzada (POA).

componer una amplia variedad de compuestos orgánicos complejos. Estos radicales hidroxilos tienen una gran capacidad para romper los enlaces de las moléculas de los contaminantes, lo que lleva a su degradación en productos más simples y menos tóxicos, como dióxido de carbono y agua [13]. Los POA pueden clasificarse en dos grupos: procesos fotoquímicos y no fotoquímicos, los procesos no fotoquímicos requieren inducción de energía para generar los radicales hidroxilos ( $\text{OH}\cdot$ ), a diferencia de los procesos fotoquímicos que requieren de luz (UV o luz visible) para producir los radicales hidroxilos ( $\text{OH}\cdot$ ) (Figura 3) [1][13][16].

### Uso de energía solar como fuente de iluminación

La necesidad de utilizar una fuente de energía para incrementar el rendimiento de los procesos de oxidación ha favorecido el uso de energía solar. Como ejemplo se tiene el caso del proceso foto-Fenton solar. Este proceso se basa en una reacción fotoquímica en la que el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) reacciona con iones de hierro ( $\text{Fe}^{2+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$ ) en presencia de luz, generando radicales hidroxilos ( $\text{OH}\cdot$ ) que son altamente reactivos y capaces de descomponer compuestos orgánicos complejos. El método puede tener diferentes variaciones, como el uso de catalizadores, luz ultravioleta, ultrasonido o microondas, las cuales buscan incrementar el porcentaje de oxidación. La radiación solar es una de las fuentes de irradiación policromática más adecuadas, si se compara con la longitud de onda de la luz UV (que tiene una longitud de onda más corta). Entre los diferentes POA impulsados por la luz, se cree que los procesos alimentados por energía solar, como el foto-Fenton solar, es uno de los procesos más ecológicos y rentables, además de ser eficientes en la decoloración de aguas residuales (Figura 4) [4].

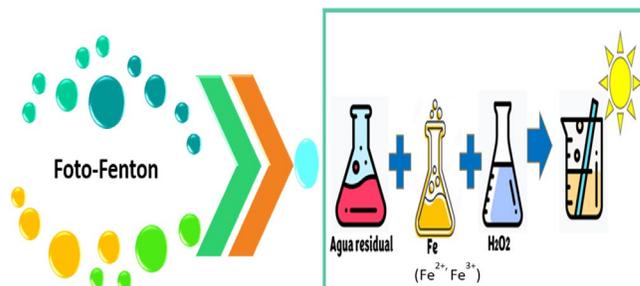


Figura 4. Proceso de Foto-Fenton.

El uso de fuentes de energía naturales disponibles para el tratamiento de aguas residuales se vuelve entonces una alternativa sostenible para reducir el uso de la energía convencional o generada a partir de combustibles fósiles (necesaria para la limpieza del agua), lo que favorece el impacto ambiental. Estas razones manifiestan la necesidad de reducir la energía aplicada, la cual se ha vuelto una prioridad en el desarrollo y aplicación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, siendo la fotocatalisis uno de los métodos que sí permiten el uso de la luz solar como una fuente de iluminación para la degradación de contaminantes, como los compuestos orgánicos persistentes o los colorantes [17,18]. Además de los métodos fotocatalíticos que permiten el uso de energía solar, métodos como el foto-Fenton tienen la fortaleza de que el hierro sea un material relativamente abundante, económico y amigable con el medio ambiente. Además, el hierro tiene una alta estabilidad frente a la radiación lumínica, la oxidación por oxígeno disuelto y las variaciones de pH, lo que lo convierte en un excelente catalizador para procesos de tratamiento de aguas residuales, como el foto-Fenton [19]. Hasta la fecha se han probado diferentes materiales de hierro como precursores del proceso foto-Fenton, incluyendo el óxido natural, el hierro a base de residuos, el hierro metálico de valencia cero, los compuestos magnéticos o arcillas modificadas, así como también materiales a base de carbono para promover la degradación de

contaminantes orgánicos. Por último, el costo también debe tomarse en consideración, por ser un factor muy importante en la eliminación de contaminantes. De manera tradicional, en un proceso foto-Fenton, los principales costos para el tratamiento de agua se asocian al uso de reactivos y de energía, variando de acuerdo con los componentes de las aguas residuales, su grado de contaminación y la eficiencia esperada para la remoción de contaminantes. Sin embargo, el costo operativo total de un proceso foto-Fenton al usar la luz solar suele ser menor en comparación con otros POA, entre los que se encuentran aquellos que utilizan radiación UV, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> o solo procesos Fenton [14].

Especialmente, en la actualidad, lo que se busca al indagar en tecnologías diferentes a las convencionales para el tratamiento de aguas residuales y así poder contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la ONU. Se debe garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.

Es importante resaltar que los altos costos de producción del agua para consumo humano, tanto en su generación, distribución, mantenimiento, potabilización y saneamiento, están siendo impactados por el crecimiento de la demanda de agua. Esto requiere de un mayor esfuerzo para el tratamiento de las aguas residuales, así como intensificar su reúso.

La captación de agua de lluvia ofrece una estrategia que permite el aumento de almacenamiento del agua, puede contribuir a reducir el estrés hídrico, evitando el uso o sobreexplotación de otras fuentes de agua como acuíferos y aguas superficiales.

Se deben de tomar acciones para remediar de manera oportuna el problema del impacto

ambiental que conlleva la falta de tratamiento de las aguas residuales, para así desarrollar un esquema de sustentabilidad en el uso del agua.

## Conclusiones

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) han sido ampliamente estudiados en el tratamiento de aguas residuales como un proceso de ahorro de energía para su tratamiento ya que, además de la luz UV, la luz solar también podría ser usada. La idea de utilizar luz visible en lugar de luz ultravioleta (UV) es realmente prometedora, ya que la luz visible constituye un porcentaje mucho mayor de la energía solar, lo que la hace más accesible y rentable. Esto abre la puerta a procesos más sostenibles y escalables en el tratamiento de aguas residuales contaminadas por colorantes y otros compuestos orgánicos persistentes.

En cuanto al proceso Fenton homogéneo, efectivamente presenta varias ventajas importantes. Este proceso, que utiliza peróxido de hidrógeno y un catalizador basado en hierro, es relativamente simple y eficiente para la degradación de contaminantes orgánicos. Uno de sus puntos fuertes es que no requiere grandes cantidades de hierro, resultando en un bajo impacto ambiental (en comparación con otros métodos de tratamiento que utilizan productos más tóxicos o costosos). Además, la capacidad de estos procesos para tratar varios tipos de contaminantes simultáneamente, y no solo los colorantes, aumenta su versatilidad y potencial en la resolución de problemas de contaminación del agua en diversas industrias. Aunque existen desafíos en términos de optimizar la eficiencia y asegurar una implementación a gran escala, la dirección en la que se está trabajando parece ser muy prometedora.

## Referencias

[1]. Tariq M., Muhammad M., Khan J., Raziq A., Kashif Uddin M., Niaz A., Ahmed Sameh S., Rahim A. Removal of Rhodamine B dye from aqueous solutions using photo-Fenton processes

- and novel Ni-Cu@MWCNTs photocatalyst, *Journal of Molecular Liquids*, 2020 (312),113399.
- [2]. Comisión Nacional de Derechos Humanos/Universidad Nacional Autónoma de México (CNDH/UNAM). Estudio sobre la protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos [https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/doc/Informes/Especiales/ESTUDIO\\_RIOS\\_LAGOS\\_ACUIFEROS.pdf](https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/doc/Informes/Especiales/ESTUDIO_RIOS_LAGOS_ACUIFEROS.pdf), 2018.
- [3]. Ahmed, I.A.; H. Ragab, A.; Habila, M.A.; Alomar, T.S.; Aljuhani, E.H. Equilibrium and Kinetic Study of Anionic and Cationic Pollutants Remediation by Limestone– Chitosan–Alginate Nanocomposite from Aqueous Solution. *Molecules*, 2021(26), 2586.
- [4]. De Moraes N., Santana R., Gomes R., Santos-Júnior S., De Lucena, A., Zaidan L.E., Napoleão D. Performance verification of different advanced oxidation processes in the degradation of the dye acid violet 17: reaction kinetics, toxicity, and degradation prediction by artificial neural networks. *Chemical Papers*. 2020 (75), 539–552.
- [5]. Morais V.S., Barrada R.V., Moura M.N., Almeida J.R., Moreira T.F.M., Gonçalves G.R., Ferreira S.A.D., Lelis M.F.F., Freitas M.B.J.G. Synthesis of manganese ferrite from spent Zn–MnO<sub>2</sub> batteries and its application as a catalyst in heterogeneous photo-Fenton processes, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020 (8), 3,103716
- [6]. Pourehié O., Saien J. Homogeneous solar Fenton and alternative processes in a pilot-scale rotatable reactor for the treatment of petroleum refinery wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020 (135), 236-243.
- [7]. Bousalah D., Zazoua H., Boudjemaa A., Benmounah A. and Bachari K. Degradation of Indigotine food dye by Fenton and photo-Fenton processes, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2020, 4609-4622.
- [8]. Silva, L., Moreira, F., Souza, A., Souza S., Boaventura, R., Vilar, V. Chemical and electrochemical advanced oxidation processes as a polishing step for textile wastewater treatment: A study regarding the discharge into the environment and the reuse in the textile industry. *J. Cleaner Produc*, 2018 (198), 430-442.
- [9]. Chen X-L., Li F., Chen HY., Wang HJ., Li GG. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> functionalized biochar as a heterogeneous catalyst for dyes degradation in water under Fenton processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020 (8),103905.
- [10]. Cui M., Li Y., Sun Y., Wang H., Li M., Li L. and Xu W. Study on Adsorption Performance of MgO/Calcium Alginate Composite for Congo Red in Wastewater. *Journal of Polymers and the Environment*, 2021(29), 3977–3987.123456789.
- [11]. Selvaraj V., Swarna Karthika T., Mansiya C., Alagar M. An over review on recently developed techniques, mechanisms and intermediate involved in the advanced azo dye degradation for industrial applications. *Journal of Molecular Structure*, (2021). 1224 ,129195.
- [12]. Ganiyu S.O., de Araújo Costa E., Martínez-Huitle C., dos Santos E.V. Electro-Fenton catalyzed by Fe-rich lateritic soil for the treatment of food colorant Bordeaux Red (E123): Catalyst characterization, optimization of operating conditions and mechanism of oxidation, *Separation and Purification Technology*, 2020 (242), 116776.
- [13]. João JJ., Silva C.S., Vieira J.L., Silveira M.F. Treatment of swine wastewater using the Fenton process with ultrasound and recycled iron. *Rev. Ambient. Água*. 2020 (3), 15.
- [14]. Gou Y., Chen P., Yang L., Li S., Peng L., Song S., Xu Y. (Degradation of fluoroquinolones in homogeneous and heterogeneous photo-Fenton processes: A review. *Chemosphere*, 2021 (270), 129481.
- [15]. Maroudas A., Pandis P.K., Chatzopoulou A., Davellas L.R., Sourkouni G., Argiris C. Decoloración sinérgica de colorantes azoicos mediante ultrasonidos, fotocatalisis y reacción foto-fenton. *Ultrason Sonochem*. 2021 (71), 105367.
- [16]. Lamkhanter H., Frindy S., Park Y., Sillanpää M., Mountacer H. Photocatalytic degradation of fungicide difenoconazole via photo-Fenton process using  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Materials Chemistry and Physics*, 2021 (267),124713.
- [17]. Foteinis S., Monteagudo J.M., Durán A., Chatzisyneon E. Environmental sustainability of the solar photo-Fenton process for wastewater treatment and pharmaceuticals mineralization at semi-industrial scale, *Science of The Total Environment*, 2018 (612), 605-612.
- [18]. Sujay-Shekar G.C., Alkanad K., Hezam A., Alsalmé A., Al-Zaqri N., Lokanath N.K. Enhanced photo-Fenton activity over a sunlight-driven ignition synthesized  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub> heterojunction catalyst enriched with oxygen vacancies, *Journal of Molecular Liquids*, 2021(335),116186.
- [19]. Villegas-Guzman P., Giannakis S., Rtimi S., Grandjean D., Bensimon M., de Alencastro L.F, Torres-Palma R. A green solar photo-Fenton process for the elimination of bacteria and micropollutants in municipal wastewater treatment using mineral iron and natural organic acids, 2017 (219), 538–549.

# Heteroestructuras de perovskitas de haluro: Forjando el futuro de los materiales

Yoarhy A. Amador Sánchez, Brenda Vargas, Diego Solis Ibarra

Laboratorio de Físicoquímica y Reactividad de Superficies (LaFRoS), Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, CU, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México  
[yoarhy@gmail.com](mailto:yoarhy@gmail.com), [diego.solis@unam.mx](mailto:diego.solis@unam.mx)

## Resumen

En un mundo donde los materiales se combinan como piezas de un rompecabezas, las heteroestructuras de materiales bidimensionales (2D) emergen como un campo de investigación fascinante y prometedor. Al apilar y mezclar capas de diferentes materiales 2D (como los dicalcogenuros de metales de transición y las perovskitas de haluro) se generan estructuras con propiedades sorprendentes y únicas. Este enfoque innovador ha capturado la imaginación de científicos e ingenieros, quienes exploran cómo estas heteroestructuras podrían revolucionar campos tan diversos como la optoelectrónica y la nanotecnología. Desde los pioneros días del grafeno hasta los desarrollos actuales con perovskitas de haluro, cada avance representa un paso hacia adelante en la creación de materiales avanzados con aplicaciones transformadoras.

## Palabras Clave

Heteroestructuras, Perovskitas, Materiales 2D

## Introducción

Imagina un mundo donde los materiales se ensamblan como piezas de un rompecabezas,

formando combinaciones que revelan propiedades sorprendentes. Así sucede cuando apilamos y mezclamos materiales bidimensionales (2D). Un material 2D es una estructura ultradelgada, de apenas unos pocos átomos de espesor, lo cual le otorga propiedades excepcionales. En estas capas, los electrones pueden moverse libremente en dos direcciones (a lo largo del plano), mientras que su movimiento se limita en la tercera (la perpendicular), generando efectos cuánticos y electrónicos únicos.<sup>1</sup> Estas características les brindan una alta conductividad eléctrica y térmica, además de una notable sensibilidad a cambios externos, como la luz o la presión. Al apilar estos materiales, se pueden formar heteroestructuras con nuevas y fascinantes propiedades (Figura 1).<sup>2</sup>

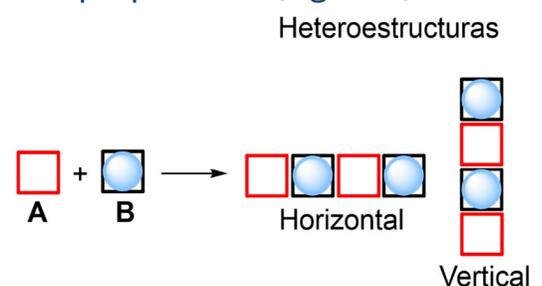


Figura 1. Heteroestructuras horizontales y verticales resultantes de la combinación de distintos materiales.

Dichas estructuras ofrecen un escenario fascinante para explorar y explotar estas novedosas propiedades. La investigación y desarrollo de estos nuevos materiales abre las puertas a avances revolucionarios en campos tan diversos como la optoelectrónica<sup>3</sup>, la nanotecnología<sup>4</sup>, entre muchos otros<sup>5</sup>. Desde los inicios del grafeno en 2004, la idea de combinar varios materiales bidimensionales (2D) para crear heteroestructuras ha sido una fuente inagotable de innovación. Esta noción se expandió a una gama diversa de materiales 2D, entre ellos, materiales derivados de metales de transición conocidos como dicalcogenuros (TMDs)<sup>6</sup>, que tienen la fórmula general  $MX_2$  (donde M es un metal de transición como Mo ó W y X un calcogenuro como S, Se y Te).

### Heteroestructuras de perovskitas de haluro

A diferencia de los TMDs, la síntesis de heteroestructuras de perovskitas de haluro ha ganado relevancia por su capacidad de ser producidas de manera rápida y eficiente en condiciones de presión y temperatura atmosféricas de reacción, evitando así técnicas de deposición más complejas como la deposición en fase vapor (CVD), que requieren condiciones más rigurosas<sup>7</sup>. Para generar este tipo de materiales se ha recurrido a técnicas creativas para combinar materiales a nivel atómico. Una forma de hacerlo, por ejemplo, es mediante la creación de heteroestructuras de perovskitas de haluro, las cuales utilizan diversos métodos en estado sólido. Uno de ellos consiste en hacer crecer cristales de perovskita derivadas de metilamonio (MA), como el  $MAPbI_3$ , sobre sustratos que contienen perovskitas de  $MAPbCl_3$ , construyendo así heteroestructuras cristalinas del tipo  $(MAPbI_3)-(MAPbCl_3)$ , Figura 2A. Otra estrategia interesante es sumergir un cristal de  $MAPbBr_3$  en una solución de  $MAPbI_3$ , lo que resulta en una heteroestructura diferente<sup>8</sup>. Figura 2B.

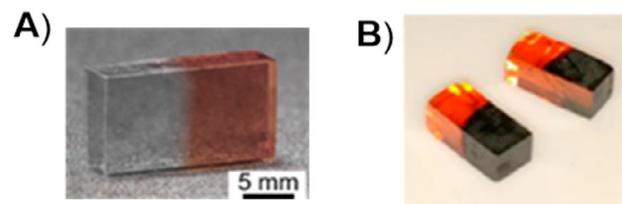


Figura 2. Heteroestructuras de (A)  $(MAPbI_3)-(MAPbCl_3)$  y (B)  $(MAPbBr_3)-(MAPbI_3)$ .<sup>7</sup>

Sin embargo, estos métodos presentan varios desafíos. Uno de los principales problemas es la rápida interdifusión de haluros, que puede ocurrir a temperaturas moderadas, bajo campos eléctricos intensos o en ambientes reactivos, como en presencia de humedad o luz ultravioleta, lo cual puede afectar la estructura final del material. Además, es fundamental formar una monocapa estable del primer material antes de añadir una segunda capa, lo que incrementa la complejidad del proceso. Para superar estos retos, los científicos han propuesto una estrategia innovadora: emplear ligantes orgánicos en lugar de metilamonio, un ligante comúnmente utilizado en la formación de estructuras 3D. Esta alternativa permite mejorar la estabilidad y el control estructural de las capas, facilitando la creación de materiales con propiedades específicas<sup>9</sup>. Esta táctica ha resultado efectiva para mejorar la estabilidad y precisión en la formación de heteroestructuras de perovskitas de haluro. Un avance significativo en este campo fue logrado al emplear moléculas orgánicas conjugadas rígidas, las cuales redujeron drásticamente la interdifusión iónica de haluros. Este hito demostró que es posible crear heteroestructuras epitaxiales laterales estables utilizando un método de síntesis en solución relativamente simple y preciso.

En 2021, el equipo de investigación liderado por Letian Dou publicó las primeras heteroestructuras verticales de perovskitas de haluro. Partiendo de un método de exfoliación similar

al utilizado para formar heteroestructuras con TMDs y otros materiales 2D<sup>10</sup>. Este estudio reafirmó la superioridad de las moléculas orgánicas más rígidas como estabilizadores, inhibiendo eficazmente la interdifusión iónica de los haluros en las heteroestructuras. Además, el mismo equipo de investigación ha presentado un estudio adicional que revela una fascinante metodología para obtener heteroestructuras laterales de perovskitas de haluro  $(\text{BA})_2\text{PbBr}_4\text{-(BA)}_2(\text{MA})_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ , empleando butil (BA) y metil (MA) amonio como cationes orgánicos (Figura 3). Estos ligantes jugaron un papel crucial al favorecer interacciones electrostáticas específicas, lo que condujo a la formación de heteroestructuras ordenadas y bien definidas. Lo que hace a este estudio particularmente significativo es que representa el primer ejemplo conocido de formación directa de heteroestructuras verticales utilizando ligantes orgánicos. Este logro no solo amplía nuestras capacidades de manipulación a nivel molecular, sino que también allana el camino para futuras innovaciones en el diseño y la fabricación de dispositivos basados en perovskitas de haluro<sup>11</sup>.

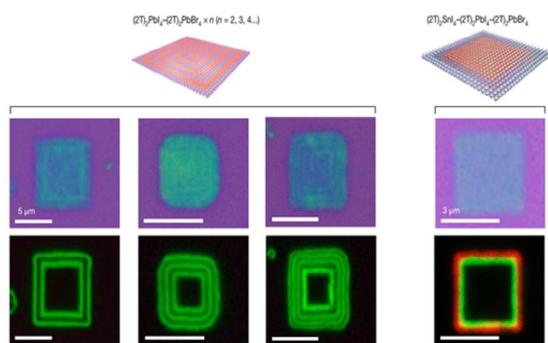


Figura 3. Heteroestructuras laterales luminiscentes hechas a partir de cationes orgánicos rígidos<sup>10</sup>.

Más recientemente, el grupo de investigación liderado por Hemamala I. Karunadasa en Stanford ha presentado un método innovador para la obtención de heteroestructuras verticales utilizando distintas perovskitas de haluro

en solución (Figura 4)<sup>12</sup>. Este proceso se basa en el uso de ligantes orgánicos bifuncionales como la cisteína (CYS) y el catión etilamonio tetrahidropirano (AMTP), lo que ha permitido la formación de heteroestructuras ordenadas con propiedades únicas y controladas, para formar la heteroestructura  $(\text{Pb}_2\text{Cl}_2)(\text{CYS})_2\text{PbCl}_4$ , donde se aislaron los monocristales a partir de una solución de las correspondientes sales de plomo en conjunto con una solución de CYS en cloruro de sodio acuoso (Figura 4, B). De manera similar, se obtuvo la heteroestructura proveniente del ligante orgánico AMTP<sup>+</sup>,  $(\text{Pb-Br}_2)_2(\text{AMTP})_2\text{PbBr}_4$ , (Figura 4, A). A diferencia de la heteroestructura que incorpora CYS, se observa una separación de las láminas de perovskita, debido al efecto que ejerce el ligante orgánico. Hasta el momento, este es el primer ejemplo de formación directa de heteroestructuras verticales utilizando ligantes orgánicos, por lo cual este estudio sienta la base para la obtención directa de semiconductores complejos auto-ensamblados en agua (el término *autoensamble* se refiere al proceso en el cual los componentes individuales de un sistema (en este caso, los ligantes orgánicos y otros componentes del semiconductor) se organizan espontáneamente en una estructura ordenada sin intervención externa adicional).

## Conclusión

Estos avances abren un nuevo horizonte en la síntesis de heteroestructuras con perovskitas de haluro. Las versátiles características químicas y físicas de estas perovskitas, combinadas con su relativa facilidad de síntesis, abren nuevas puertas para el desarrollo de heteroestructuras que tienen el potencial de revolucionar numerosas áreas de aplicación, incluyendo la electrónica y la óptica. En pocas palabras, las heteroestructuras de perovskitas de haluro representan un emocionante salto adelante en la creación de materiales avanza-

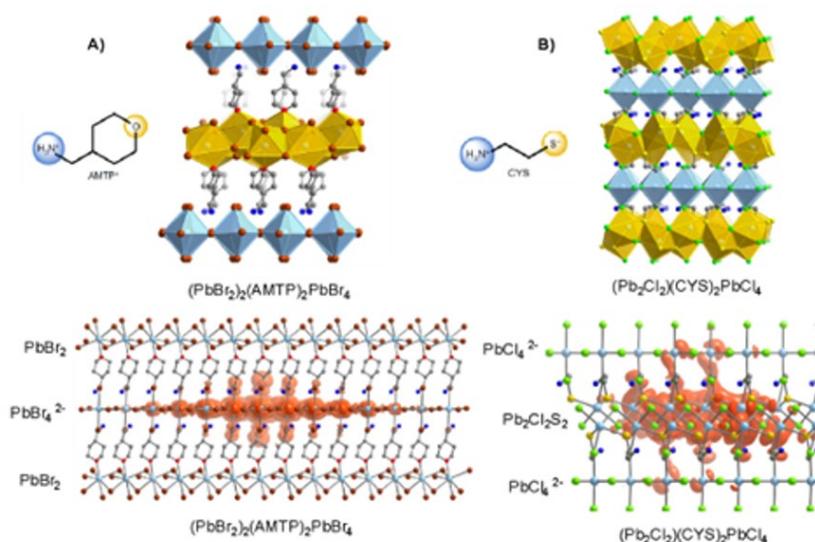


Figura 4. Estructuras de rayos-X de monocristal de las heteroestructuras  $(\text{Pb}_2\text{Cl}_2)(\text{CYS})_2\text{PbCl}_4$  y  $(\text{PbBr}_2)_2(\text{AMTP})_2\text{PbBr}_4$  obtenidas en soluciones acuosas<sup>11</sup>.

dos, con un potencial gigantesco para generar nuevas sustancias con propiedades únicas y fascinantes. A medida que continuamos explorando y perfeccionando estas técnicas, es probable que veamos avances importantes que impulsen la creación de tecnologías innovadoras en una variedad de campos científicos y tecnológicos.

## Agradecimientos

Yoarhy A. Amador Sánchez agradece a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM (DGAPA-UNAM) por la beca posdoctoral otorgada.

## Referencias

1. Twenty years of 2D materials. (2024). *Nature Physics*, 20(1), 1–1. <https://doi.org/10.1038/s41567-023-02381-0>
2. A. Castellanos-Gomez, X. Duan, Z. Fei, H. R. Gutierrez, Y. Huang, X. Huang, J. Querada, Q. Qian, E. Sutter, P. Sutter, Van der Waals heterostructures. *Nat Rev Methods Primers* 2, 58 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00139-1>
3. L. Zhang, H. Qiu, R. Shi, J. Liu, G. Ran, W. Zhang, G. Sun, R. Long, W. Fang, Charge Transport Dynamics of Quasi-Type II Perovskite Janus Nanocrystals in High-Performance Photoconductors. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 14(7), 2023, 1823–1831. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.3c00198>

4. L. Carbone, P. D. Cozzoli. Colloidal heterostructured nanocrystals: Synthesis and growth mechanisms. *Nano Today*, 5(5), 2010, 449–493. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2010.08.006>
5. M.-Y. Li, C.-H. Chen, Y. Shi, L.-J. Li, Heterostructures based on two-dimensional layered materials and their potential applications. *Materials Today*, 19(6), 2016, 322–335. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.11.003>
6. K. S. Novoselov, A. Mishchenko, A. Carvalho, A. H. Castro Neto, 2D Materials and van Der Waals Heterostructures. *Science*, 353 (6298), 2016. <https://doi.org/10.1126/science.aac9439>
7. S. Bera, N. Pradhan, Perovskite Nanocrystal Heterostructures: Synthesis, Optical Properties, and Applications. *ACS Energy Letters*, 5(9), 2020, 2858–2872. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.0c01449>
8. Y. Liu, S. Zhang, J. He, Z. M. Wang, Z. Liu, Recent Progress in the Fabrication, Properties, and Devices of Heterostructures Based on 2D Materials. *Nano-Micro Lett.* 11 (1), 2019, 1–24. <https://doi.org/10.1007/s40820-019-0245-5>
9. N. Fiuzza-Maneiro, K. Sun, I. López-Fernández, S. Gómez-Graña, P. Müller-Buschbaum, L. Polavarapu, Ligand Chemistry of Inorganic Lead Halide Perovskite Nanocrystals. *ACS Energy Letters*, 8 (2), 2023, 1152–1191. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.2c02363>
10. Akriti, E. Shi, S. B. Shiring, J. Yang, C. L. Atencio-Martinez, B. Yuan, X. Hu, Y. Gao, B. P. Finkenauer, A. J. Pistone, Y. Yu, P. Liao, B. M. Savoie, L. Dou, Layer-by-Layer Anionic Diffusion in Two-Dimensional Halide Perovskite Vertical Heterostructures. *Nat. Nanotechnol.*, 16 (5), 2021, 584–591. <https://doi.org/10.1038/s41565-021-00848-w>
11. E. Shi, B. Yuan, S. B. Shiring, Y. Gao, Akriti, Y. Guo, C. Su, M. Lai, P. Yang, J. Kong, B. M. Savoie, Y. Yu, L. Dou, Two-dimensional halide perovskite lateral epitaxial heterostructures. *Nature*, 580(7805), 2020, 614–620. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2219-7>
12. M. L. Aubrey, A. Saldivar Valdes, M. R. Filip, B. A. Connor, K. P. Lindquist, J. B. Neaton, H. I. Karunadasa, Directed Assembly of Layered Perovskite Heterostructures as Single Crystals. *Nature*, 597 (7876), 2021, 355–359. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03810-x>

# Importancia de los oleogeles como sustitutos de grasa en el área alimentaria y farmacéutica

Lucila Concepción Núñez-Bretón<sup>1</sup>, Bárbara Leslie Cooper-Bribiesca<sup>2</sup>, Luis Medina-Torres<sup>3</sup>, Cristóbal Erik Torres-González<sup>4</sup>, Francisco Erik González-Jiménez<sup>4</sup>, O. Manero<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones en Materiales, Departamento de Reología y Mecánica de Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México

<sup>2</sup> Escuela Nacional Preparatoria, Plantel 2 Erasmo Castellanos Q., Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Río Churubusco #654. Colonia Lic. Carlos Zapata Vela, Delegación Iztacalco, C.P. 08040 Ciudad de México, México

<sup>3</sup> Facultad de Química, UNAM. Circuito Exterior S/N, Coyoacán, Cd. Universitaria, 04510, Ciudad de México, CDMX.

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Orizaba, Veracruz, México  
[lucilanunez-breton@materiales.unam.mx](mailto:lucilanunez-breton@materiales.unam.mx)

## Resumen

En la última década, la ingesta generalizada de grasas saturadas y grasas trans en la dieta humana ha sido blanco de estudio dentro de la comunidad científica. El consumo no moderado de estos aumenta el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares, así como el desarrollo de patologías como cáncer o diabetes. Este problema de salud pública se ha convertido en un nuevo desafío para encontrar alternativas viables que reemplacen las grasas perjudiciales en los alimentos de consumo diario sin afectar las propiedades organolépticas de los productos y se han creado diversas estrategias destinadas a reducir o reemplazar este tipo de grasas en los alimentos. En este contexto, los oleogeles han emergido como una solución prometedora y una alternativa para diversas aplicaciones industriales debido a sus beneficios nutricionales y ambientales. Estos biomateriales que combinan aceites líquidos y agentes gelificantes ofrecen propie-

dades similares a las grasas sólidas sin los efectos negativos asociados a estas últimas, manteniendo la calidad de los alimentos además de proveer un vehículo para fármacos, probióticos o sustancias bioactivas.

## Palabras claves:

Oleogeles, biomateriales, aceites, biopolímeros, grasas.

## ¿Qué es un oleogel?

Es un sistema semisólido compuesto por un disolvente orgánico, como el aceite, que es inmovilizado por un agente oleogelante, que lo atrapa al formar una red de gel tridimensional termorreversible (Figura 1). En el sector alimentario, se emplea aceite comestible como disolvente orgánico para la formación de oleogeles. Dichos materiales comestibles contienen aceites vegetales con un contenido predominante de grasas insaturadas (mayor al 75 %) y con una pequeña cantidad de agentes

oleogelantes. Tienen la naturaleza elástica y semisólida de las grasas animales, mientras conservan las características químicas originales del aceite, otorgando propiedades similares a las de las grasas sólidas. Incluyendo las propiedades de elasticidad, viscosidad y funcionalidad, además de que permiten la inclusión de compuestos bioactivos de naturaleza lipofílica (antioxidantes, vitaminas) (Millao et al., 2023; Pinto et al., 2021). La composición química de los oleogelantes es diversa: ceras vegetales, mono y diglicéridos, derivados de celulosa, gomas, fosfolípidos, fitoesteroles y polisacáridos. La formación y características de los oleogeles dependerá de la naturaleza del agente oleogelante y el método de producción utilizado. La consolidación de las estructuras gelificantes se propicia mediante puentes de hidrógeno, apilamiento tipo  $\pi$ - $\pi$ , fuerzas electrostáticas e interacciones de Van der Waals que forman los espacios hidrofóbicos capaces de retener la fase oleosa (Millao et al., 2023). La mayoría de los biopolímeros comestibles utilizados como oleogelantes (almidones, celulosa) son de naturaleza hidrofílica, lo que dificulta su uso con ese fin. Sin embargo, es posible modificarlos bajo diferentes técnicas para proveerlos de propiedades para que interactúen con sustancias hidrofóbicas, por ejemplo, el almidón puede modificarse por esterificación con anhídrido octenil succínico o por entrecruzamiento (crosslinking), para incrementar su hidrofobicidad y estabilidad. Debido a sus propiedades, los oleogeles se están posicionando en la industria alimentaria para ofrecer alternativas más saludables a las grasas sólidas animales, que contienen ácidos grasos saturados, sustituyendo materias primas en la elaboración de embutidos, mezclas cárnicas, galletas, productos lácteos entre otros (Gao & Wu, 2019). Por su actividad superficial, características termorreversibles, origen natural y por ser elaborados a partir de

sustancias generalmente reconocidas como seguras por la Food and Drug Administration (FDA), los oleogeles empiezan a cobrar importancia para la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética.

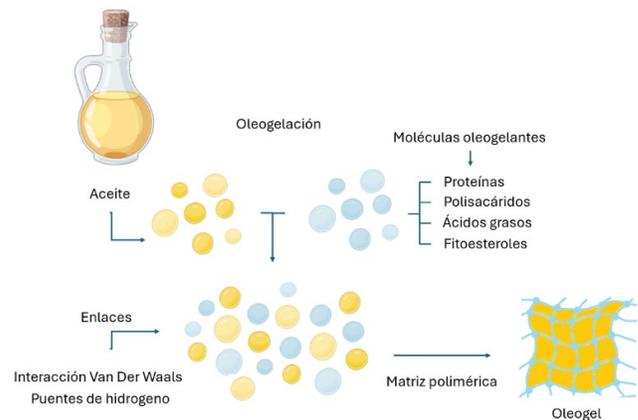


Figura 1. Esquema de la formación de un oleogel.

### ¿Cómo se obtiene un oleogel?

Para desarrollar oleogeles funcionales en diversas aplicaciones, es fundamental considerar ciertas características esenciales, como la hidrofobicidad, la cristalinidad y la temperatura de transición vítrea. Estas propiedades determinan si una molécula específica, o una combinación de moléculas, pueden actuar como oleogelantes eficientes. Además, la naturaleza de la molécula gelificante desempeña un papel crucial en las propiedades finales del oleogel, influyendo en aspectos como la textura, la opacidad, la temperatura de fusión y la capacidad de retener el aceite. Por otro lado, la elección de la fase oleosa también resulta determinante, ya que el perfil de ácidos grasos de dicha fase afecta directamente las características finales del oleogel.

Cada aceite tiene características fisicoquímicas propias, determinadas por los pesos moleculares, grado de insaturación, tipo y cantidad de ácidos grasos. La interacción del aceite con el oleogelante variará según la viscosidad y polaridad del aceite (Gengatharan et al.,

2023). Con base en lo descrito anteriormente, se pueden mencionar diversos mecanismos de gelificación como: cristalización de ácidos grasos, redes fibrilares auto ensambladas o redes poliméricas (esta última dividiéndose en gelificación directa y gelificación indirecta y la formación de puentes capilares).

La **cristalización de ácidos grasos** es un proceso de preparación en el cual los oleogelantes, al alcanzar una concentración específica, forman estructuras cristalinas capaces de encapsular el aceite y generar una matriz sólida al enfriarse. Estos oleogelantes están compuestos por largas cadenas hidrocarbonadas y abarcan una variedad de sustancias cristalinas, como ceras naturales, monoacilglicérols, diacilglicérols, ácidos grasos, alcoholes grasos, fitoesteros, ésteres de sorbitán y fosfolípidos. Durante la cristalización, estos compuestos generan cristales con forma de aguja que crean una red tridimensional, donde el aceite queda atrapado, dando lugar al proceso de oleogelación. Los oleogeles obtenidos a través de este método destacan por su alta capacidad para retener aceite, incluso a bajas concentraciones, característica que depende principalmente de la estructura y morfología de los cristales formados (Manzoor et al., 2022).

La oleogelación basada en redes fibrilares autoensambladas (SAFIN) se fundamenta en el autoensamblaje del oleogelante en solventes no polares, utilizando interacciones no covalentes como enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals. Estas interacciones promueven el crecimiento unidimensional de fibras, generando una matriz cristalina con forma de cinta helicoidal que retiene el líquido. Las condiciones ambientales, como la velocidad de enfriamiento y la temperatura de almacenamiento, afectan las interacciones responsables de la formación de estas redes, influyendo en

la longitud de las fibras y, consecuentemente, en la dureza y densidad de los oleogeles resultantes (Okesola et al., 2015).

La formación de oleogeles mediante redes poliméricas utiliza polímeros aptos para alimentos como agentes estructurantes. Estos polímeros encapsulan la fase oleosa dentro de una red tridimensional, la cual se genera a través de procesos directos o indirectos. Entre los compuestos comúnmente empleados en esta técnica se encuentran la etilcelulosa, metilcelulosa, hidroxipropilmetilcelulosa, zeína,  $\beta$ -lactoglobulinas, gelatina, goma xantana, quitosano, quitina, el copolímero de etileno-acetato de vinilo y el almidón, siendo la etilcelulosa el polímero predominante. Este enfoque para la oleogelación se clasifica en dos métodos principales: dispersión directa y dispersión indirecta (Figura 2).

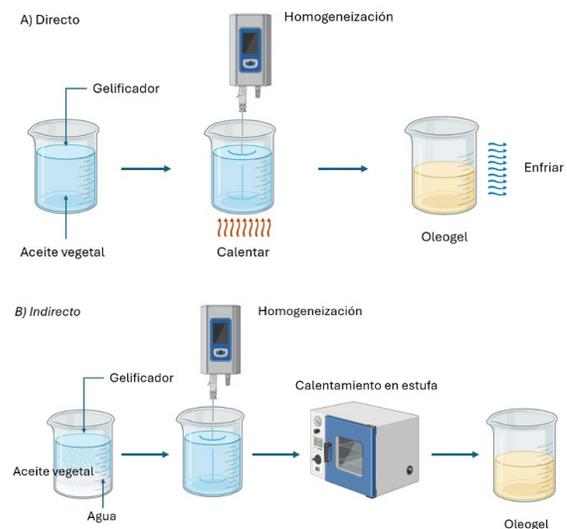


Figura 2. Métodos de oleogelación por redes poliméricas: A) Método directo y B) Método indirecto.

En el método **directo** se induce la oleogelación mediante la dispersión de un polímero cristalino en aceite, calentándose más allá de la temperatura de transición vítrea del polímero ( $\approx 140$  °C) y agitando a esta temperatura de mantenimiento para formar una dispersión

uniforme. Al enfriarse la mezcla, se induce la gelificación mediante la interacción por puentes de hidrógeno entre cadenas poliméricas (Gravelle et al., 2014).

El método de dispersión **indirecta** se basa en el proceso de emulsificación y el método de intercambio de solventes. Este tipo de oleogelación permite el uso de oleogelantes hidrofílicos como algunos polisacáridos (Manzoor et al., 2022).

Recientemente se ha utilizado el método de formación de **puentes capilares** formados por agua entre los gránulos de almidón para hacer oleogeles. En este método se forma primero una suspensión de partículas (oleogelante) en el aceite y se agrega un fluido insoluble como el agua mientras se hace una agitación intensa para distribuirla en la suspensión, esta interactúa con la superficie de las moléculas hidrófilas formando uniones capilares entre ellas y atrapando al aceite. Con este método se tienen las ventajas de no calentar excesivamente el aceite manteniendo sus propiedades originales. Es rápido y permite el uso de biopolímeros hidrofílicos comestibles como el almidón (Liu et al., 2024).

### ¿Cuál es su utilidad y en qué industria son aplicables?

Debido a sus propiedades, los oleogeles encuentran aplicaciones en diversas áreas, entre ellas la cosmética y la farmacéutica, pero es mayormente empleada en la industria alimentaria, como sustituto de grasas sólidas en una gran diversidad de productos de panadería, cárnicos, confitería y lácteos (Tabla 1).

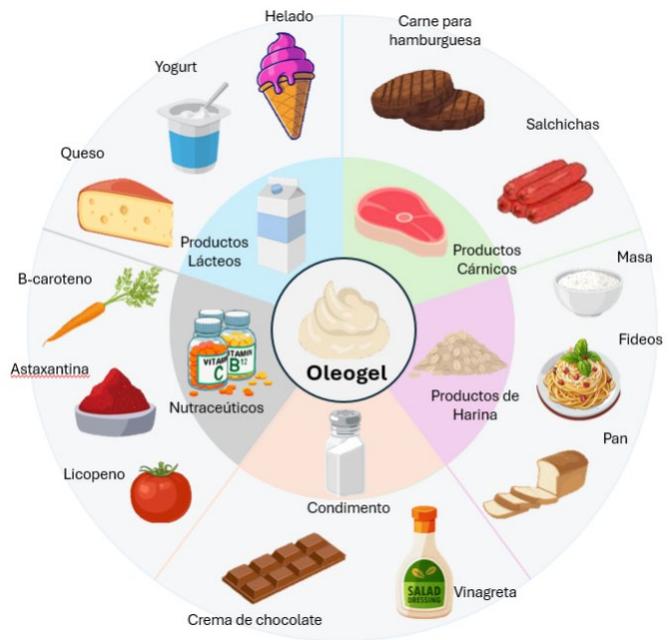


Figura 3. Uso de oleogeles como sustitutos de grasas en alimentos.

Tabla 1. Aplicaciones de oleogeles en industrias productivas

Industria	Sector	Uso	Referencia
Farmacéutica	Investigación	Encapsulan y apoyan en la liberación controlada y específica de nutraceuticos liposolubles como caroteno, licopeno, coenzima Q10, ácido docosahexaenoico, ácido eicosapentaenoico, taninos, etc.	O'Sullivan et al., 2017
	Dermocosmética	Vehículo de fármacos dérmicos y cosméticos, como sustituto del petrolato.	Balasubramanian et al., 2012
Alimentaria	Panadería	Proporcionan una alternativa saludable a las grasas saturadas y a las grasas hidrogenadas, reemplazando a las mantecas y mantequilla utilizadas, sin afectar las características del producto final.	Mert & Demirkesen, 2016
	Productos cárnicos	Se prevé que el uso de oleogeles en la fabricación de embutidos pueda mejorar el perfil de ácidos grasos, sin alterar las propiedades organolépticas.	Jimenez-Colmenero et al., 2015
	Confitería	Encuentran su aplicación en el sector chocolatero, permitiendo el desarrollo de chocolates termotolerantes, reemplazando el aglutinante de aceite en la pasta de chocolate y controlando la sinéresis de la grasa durante el almacenamiento.	Stortz & Marangoni, 2013
	Fritura	Se ha demostrado que los fideos fritos con oleogel absorben menos aceite, conservan mejor la textura y muestran una reducción de ácidos grasos, entre otros productos.	Lim et al., 2017

## Métodos de caracterización

Al ser matrices de composición variable, es necesario caracterizar a los oleogeles en cuanto a sus propiedades químicas, físicas y funcionales. La composición de los oleogelantes contribuye significativamente a las propiedades fisicoquímicas finales del oleogel, siendo un factor importante para comprender la relación entre la microestructura y la funcionalidad del gel. El tipo, concentración y composición de los oleogelantes, las variables del proceso de preparación del oleogel (como la velocidad de agitación o enfriamiento), así como las condiciones de almacenamiento tienen un efecto profundo en el comportamiento cristalino. Entre las caracterizaciones funcionales usualmente reportadas se mide tanto la textura como la capacidad de fijación del aceite y la estabilidad al almacenamiento. La oxidación del aceite retenido (cuantificada mediante índice de peróxidos) permite asignarle tiempo de vida útil, así como establecer las condiciones necesarias para su almacenamiento. Los métodos más comunes para estudiar las características estructurales incluyen microscopía de luz óptica, de luz polarizada, barrido láser confocal (CLSM), microscopía electrónica de transmisión (TEM) y microscopía electrónica de barrido (SEM). El análisis de difracción de rayos X proporciona información sobre la morfología de los cristales y los polimorfos formados en los oleogeles. Las técnicas espectroscópicas como la resonancia magnética nuclear e infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) ayudan a interpretar las diversas interacciones químicas que pueden ocurrir entre los grupos funcionales involucrados. La calorimetría diferencial de barrido (DSC) se emplea como herramienta analítica para evaluar el comportamiento térmico, la homogeneidad de los cristales o estructuras que retienen el aceite y, por tanto, los usos posibles de acuerdo con temperaturas de procesos de producción.

## Conclusiones

Los oleogeles surgieron por la necesidad de reemplazar progresivamente a las grasas sólidas convencionalmente utilizadas en la elaboración de alimentos y se han convertido en una alternativa prometedora que no compromete la calidad de los productos y satisface las necesidades de una población de consumidores cada vez más consciente de su salud. La composición química de los oleogeles es esencial para definir su comportamiento y funcionalidad. Dependiendo de su formulación, los oleogeles pueden adaptarse a las necesidades específicas de diferentes sistemas alimentarios, ofreciendo soluciones saludables sin comprometer el sabor ni la textura. En comparación con las grasas convencionales, los oleogeles presentan una mayor estabilidad, lo que amplía su rango de aplicaciones y asegura su efectividad a largo plazo. Actualmente, los oleogeles han encontrado uso en diversas áreas de la industria alimentaria, como la producción de productos de panadería, confitería, cárnicos y frituras. También han demostrado ser una herramienta eficiente para la incorporación y entrega de compuestos bioactivos, potenciando el valor nutricional de los alimentos. La versatilidad y beneficios de los oleogeles no solo los posicionan como una alternativa eficaz a las grasas sólidas, sino también como una innovación tecnológica con el potencial de transformar la industria alimentaria.

## Referencias

- [1]. Balasubramanian, R., Sughir, A.A., & Damodar G. (2012) Oleogel: A promising base for transdermal formulations. *Asian Journal of Pharmaceutics*, 6(1), 1-9 <https://doi.org/10.4103/0973-8398.100118>
- [2]. Gao, Y., & Wu, S. (2019). Thermal and oxidation stability of functional oleogels formed by edible wax/starch and Schisandra chinensis oil. *Food & Function*, 10, 12, 8056–8068. <https://doi.org/10.1039/C9FO01727E>
- [3]. Gengatharan, A., Mohamad, N.V., Zahari, C.N.M.C., & Vijayakumar, R. (2023). Oleogels: Innovative formulations as fat substitutes and bioactive delivery systems in food and

- beyond. *Food Structure*, 38:100356. <http://doi.org/10.1016/j.foostr.2023.100356>
- [4]. Gravelle, A. J., Barbut, S., Quinton, M., & Marangoni, A. G. (2014). Towards the development of a predictive model of the formulation-dependent mechanical behaviour of edible oil-based ethylcellulose oleogels. *Journal of Food Engineering*, 143, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.06.036>
- [5]. Gravelle, A.J., Davidovich-Pinhas, M., Zetzl, A.K., Barbut, S., & Marangoni, A.G. (2016). Influence of solvent quality on the mechanical strength of ethylcellulose oleogels. *Carbohydrate Polymers*, 135, 169-179. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.08.050>
- [6]. Jimenez-Colmenero, F., Salcedo-Sandoval, L., Bou, R., Cofrades, S., Herrero, A. M., & Ruiz-Capillas, C. (2015). Novel applications of oil-structuring methods as a strategy to improve the fat content of meat products. *Trends in Food Science & Technology*, 44(2), 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.011>
- [7]. Lim, J., Jeong, S., Oh, I. K., & Lee, S. (2017). Evaluation of soybean oil-carnauba wax oleogels as an alternative to high saturated fat frying media for instant fried noodles. *LWT*, 84, 788–794. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.06.054>
- [8]. Liu, H., McClements, D.J., Jin, Z., Chen, L. (2024). Pea starch-based oleogels based on capillary water crosslinking: physicochemical properties and 3D printing performance. *Food hydrocolloids*, 154, 110161. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110161>
- [9]. Manzoor, S., Masoodi, F. A., Naqash, F., & Rashid, R. (2022). Oleogels: Promising alternatives to solid fats for food applications. *Food Hydrocolloids for Health*, 2, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2022.100058>
- [10]. Mert, B., & Demirkesen, I. (2016). Reducing saturated fat with oleogel/shortening blends in a baked product. *Food Chemistry*, 199, 809–816. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.087>
- [11]. Millao, S., Iturra, N., Contardo, I., Morales, E., Quilaqueo, M., & Rubilar, M. (2023). Structuring of oils with high PUFA content: Evaluation of the formulation conditions on the oxidative stability and structural properties of ethylcellulose oleogels. *Food Chemistry*, 405, 134772. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134772>
- [12]. Okesola, B. O., Vieira, V. M. P., Cornwell, D. J., Whitelaw, N. K., & Smith, D. K. (2015). 1,3:2,4-Dibenzylidene-D-sorbitol (DBS) and its derivatives – efficient, versatile and industrially-relevant low-molecular-weight gelators with over 100 years of history and a bright future. *Soft Matter*, 11(24), 4768–4787. <https://doi.org/10.1039/C5SM00845J>
- [13]. O’Sullivan, C. M., Davidovich-Pinhas, M., Wright, A. J., Barbut, S., & Marangoni, A. G. (2017). Ethylcellulose oleogels for lipophilic bioactive delivery – effect of oleogelation on in vitro bioaccessibility and stability of beta-carotene. *Food & Function*, 8(4), 1438–1451. <https://doi.org/10.1039/C6FO01805J>
- [14]. Pinto, T.C., Martins, A.J., Pastrana, L., Pereira, M.C., & Cerqueira, M.A. (2021). Oleogel-Based Systems for the Delivery of Bioactive Compounds in Foods. *Gels*, 7, 86. <https://doi.org/10.3390/gels7030086>
- [15]. Stortz, T. A., & Marangoni, A. G. (2013). Ethylcellulose solvent substitution method of preparing heat resistant chocolate. *Food Research International*, 51(2), 797–803. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.01.059>

# Termómetro con función de autocalibración *in situ* en la temperatura de Curie en materiales ferroeléctricos

Sebastián Marín Toro, Marc Schalles, Pavo Vrdoljak

Endress + Hauser Wetzler GmbH + Co. KG. Obere Wank 1. 87484 Nesselwang. Alemania

[Sebastian.Marin@endress.com](mailto:Sebastian.Marin@endress.com)

## Resumen

En los procesos industriales, la lectura de los termómetros puede variar o desviarse con el tiempo. Para minimizar el riesgo de estos errores no detectados en la medición de la temperatura es necesario recalibrar periódicamente los termómetros fuera del proceso. Sin embargo, este procedimiento suele ser laborioso y costoso. Otra alternativa es la calibración *in situ*, directamente en el proceso industrial. Este enfoque utiliza una temperatura de referencia (con trazabilidad metrológica y estable a largo plazo) dentro de las mismas condiciones de los procesos industriales. Para ello, suelen emplearse las temperaturas de fusión o solidificación de sustancias puras o aleaciones, contenidas en crisoles miniaturizados que se integran a los termómetros conocidos como miniceldas de punto fijo.

En este artículo se propone una alternativa más simple, compacta y duradera basada en un nuevo enfoque que utiliza la temperatura de Curie  $T_c$  de los materiales ferroeléctricos. En esta temperatura, el material pasa de la fase

paraeléctrica a la ferroeléctrica. Uno de estos materiales se integró en un termómetro industrial compacto disponible actualmente en el mercado. El material proporciona una temperatura de referencia de  $T_c \approx 118 \text{ }^\circ\text{C}$ , que permite calibraciones automatizadas, cada vez que la temperatura del proceso industrial desciende por debajo de esta temperatura de referencia. Tanto el material de referencia como los termómetros se probaron en condiciones de laboratorio y en procesos industriales. En las pruebas de laboratorio, realizadas a largo plazo con 10 termómetros y cerca de 2500 calibraciones de cada uno, se obtuvo una desviación estándar de la  $T_c$  inferior a 45 mK. La alta estabilidad y reproducibilidad de los termómetros fue confirmada también en pruebas de campo realizadas en las industrias farmacéutica y alimenticia. La incertidumbre de la  $T_c$ , con un factor de cobertura de  $k = 2$ , se calculó en  $U = 349 \text{ mK}$ .

## Palabras clave:

Termometría, autocalibración, materiales ferroeléctricos, temperatura de Curie, trazabilidad.

## Introducción

Los termómetros deben ser calibrados con frecuencia en diversas aplicaciones industriales para garantizar mediciones fiables de la temperatura. Los procesos en biociencias, así como en las industrias alimenticia y farmacéutica, requieren especialmente estas calibraciones, ya que los productos fabricados son relevantes para la seguridad humana. Las instalaciones de estos procesos deben limpiarse con frecuencia para garantizar la fabricación de productos seguros y de alta calidad. Esto implica la limpieza de tuberías y contenedores con vapor de agua (limpieza *in situ* con vapor o SIP por sus siglas en inglés *Steam in Place*) o productos químicos (limpieza *in situ* o CIP por sus siglas en inglés *Cleaning in Place*). En ambos procedimientos, la temperatura es un parámetro crítico para comprobar el éxito de la misma. Además, una medición correcta de la temperatura garantiza un funcionamiento energéticamente eficiente, prolonga la vida útil de las instalaciones y garantiza la alta calidad del producto fabricado.

## Estado del arte de calibraciones de termómetros fuera del proceso industrial

El número típico de termómetros instalados en una planta varía de unos pocos hasta cientos o miles. Su calibración periódica es exigida por normas emitidas por entidades como la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés) o incluidas dentro de las Buenas Prácticas de Fabricación (GMP, por sus siglas en inglés), de las cuales los operarios de planta derivan sus directrices y procedimientos de calibración específicos. Los intervalos de calibración habituales oscilan entre uno y dos años. En este caso, los termómetros se desmontan de su ubicación en el proceso industrial y se trasladan a una instalación de calibración externa, como se

muestra en la Figura 1. Este procedimiento consume mucho tiempo y supone un gran esfuerzo, lo que implica también un costo elevado. Por esta razón, se opta por periodos de calibración lo más largo posibles. Aunque las calibraciones reducen el riesgo de que se produzcan errores no detectados en la medición de temperatura, los operarios de la planta realizan una evaluación de riesgos para minimizar el riesgo de error y los costos de la calibración.



Figura 1. Esquema de un procedimiento de calibración típico de termómetros por fuera del proceso industrial. Los termómetros deben desmontarse de su instalación industrial y trasladarse a un laboratorio de calibración (1), donde se realiza la calibración (2), se documenta y certifica (3), antes de que el termómetro vuelva a instalarse en el proceso industrial (4).

## Estado del arte de calibraciones de termómetros *in situ*

Desde el punto de vista del operario, una calibración ideal debería realizarse con la mayor frecuencia posible, por ejemplo, diariamente, semanalmente o después de la producción de un lote de un producto, sin requerir esfuerzo adicional. Sin embargo, esto no es posible con las calibraciones tradicionales de termómetros fuera del proceso industrial. En su lugar se pueden realizar calibraciones *in situ*, es decir, directamente en el proceso industrial. Para ello, es necesario contar con una temperatura de referencia en el punto de medición, que se puede obtener utilizando "puntos fijos" de temperatura.

Las calibraciones de “punto fijo” representan el estado del arte en calibraciones precisas de termómetros. En este enfoque, los termómetros se colocan en un campo de temperatura homogéneo estacionario, a una temperatura de transición de fase bien conocida, como el punto de fusión, solidificación o triple de una sustancia pura [1] o de una aleación deseada [2]. Un ejemplo bien conocido es el punto de fusión del agua pura, cuya temperatura de transición de fase  $T_f = 0\text{ °C}$  a presión atmosférica normal. Los crisoles utilizados para mantener las sustancias durante la transición de fase suelen contener varios centímetros o decímetros cúbicos de tales sustancias y están diseñados exclusivamente para uso en laboratorio. Al reducir las dimensiones del crisol a unos pocos milímetros o centímetros cúbicos, y por ende del volumen de la sustancia de punto fijo, se obtienen las denominadas miniceldas de punto fijo. Debido a las dimensiones reducidas de estos sistemas, las miniceldas de punto fijo pueden ser integradas en termómetros o aparatos técnicos, como se muestra en la Figura 2. De esta manera pueden emplearse para calibraciones en laboratorios [3] así como *in situ* en aplicaciones industriales [4].

La idoneidad de las miniceldas de punto fijo para la calibración o validación de termómetros *in situ* ha sido demostrada para diferentes aplicaciones y sustancias de punto fijo. Sin embargo, existen algunas limitaciones que restringen su uso. Por ejemplo, la temperatura de punto fijo se establece mediante el calor latente que libera o absorbe la sustancia de punto fijo durante la transición de fase, lo que mantiene constante la temperatura de la minicelda y asegura un equilibrio térmico. Durante la calibración, el termómetro se acopla térmicamente a la transición de fase, por lo que durante este intervalo de tiempo no puede medir la temperatura del proceso industrial donde se encuentra instalado. Esto representa una desventaja para procesos industriales que requieren una monitorización continua de la temperatura, especialmente para aplicaciones de control o seguridad. Además, la fabricación de las miniceldas de punto fijo es un proceso complejo, ya que, en algunos casos, implica la manipulación de metales fundidos durante el llenado y las miniceldas deben soportar esfuerzos termomecánicos. De igual manera, se debe evitar la contaminación de la sustancia de punto fijo durante la fabricación de la minicelda y durante toda la vida útil del

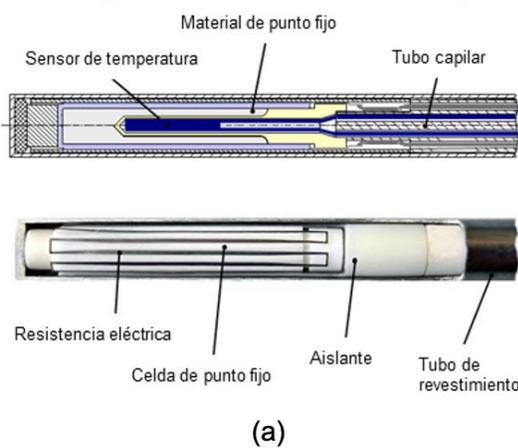


Figura 2. Ejemplos de miniceldas de punto fijo: (a) termómetro de 6 mm de diámetro exterior con minicelda de punto fijo integrada para su uso en temperaturas desde 300 °C hasta 650 °C [4], (b) celda con composición eutéctica Ru-C ( $T_f \approx 1954\text{ °C}$ ) acoplada directamente a un termómetro de vástago largo [5], (c) celda de Ga ( $T_f \approx 29.7\text{ °C}$ ) de 6 mm de diámetro exterior para su uso integrado en una instalación de calibración montada en un satélite [6].

termómetro, para garantizar la estabilidad de la temperatura de transición de fase a largo plazo. Para superar estas desventajas se ha desarrollado una nueva tecnología para calibraciones in situ, que utiliza la temperatura de Curie  $T_c$  de los materiales ferroeléctricos como temperatura de referencia.

### Calibración de termómetros en la temperatura de Curie

Para la calibración de termómetros, las transformaciones de fase deben presentar una temperatura de transición de fase estable a largo plazo, reproducible y fácilmente detectable. Además, la transición de fase debe ocurrir en un intervalo estrecho de temperatura y tiempo, como ocurre en las transiciones de fase de primer orden. Un ejemplo de esto es el cambio abrupto de la entalpía durante la fusión o la solidificación de sustancias de punto fijo.

### Materiales ferroeléctricos

Los materiales ferroeléctricos sólidos presentan transiciones de fase de primer orden y tienen estructuras cristalinas que cambian con la temperatura. Generalmente, presentan una fase de alta temperatura con una red cristalina simétrica y al menos una fase de baja temperatura con una simetría reducida. La fase de alta temperatura es paraeléctrica, lo que significa que no existe polarización eléctrica espontánea en el material, mientras que la fase de baja temperatura es ferroeléctrica y tiene una polarización eléctrica espontánea. La temperatura de transición de la fase ferroeléctrica a la fase paraeléctrica (característica de cada material) se conoce como temperatura de Curie  $T_c$ . En los materiales ferroeléctricos con una transición de fase de primer orden, el parámetro de polarización eléctrica espontánea  $P$  para un solo cristal cambia abruptamente y su derivada  $P'(T)$  pre-

senta una discontinuidad en la temperatura de transición de fase, equivalente a  $T_c$ .

La polarización espontánea, la susceptibilidad eléctrica  $\eta$  y la permitividad relativa  $\epsilon_r$  están relacionadas de acuerdo con las ecuaciones (1) y (2):

$$\vec{P} = \epsilon_0 \eta \vec{E}, \quad (1)$$

$$\eta = \epsilon_r - 1, \quad (2)$$

donde  $\vec{E}$  representa el campo eléctrico aplicado y  $\epsilon_0$  la permitividad eléctrica en el vacío.

En esta publicación se utiliza el titanato de plomo ( $\text{PbTiO}_3$ ) como un ejemplo para explicar la teoría relacionada con los materiales ferroeléctricos. La celda unitaria del  $\text{PbTiO}_3$  experimenta una transición de la fase cúbica a la tetragonal en la temperatura de Curie, como se muestra en la Figura 3(a). En este proceso, el átomo de titanio se desplaza de su posición central y el octaedro de oxígeno (representado por las líneas azules) se deforma. Como resultado, los centros de las cargas positivas y negativas ya no coinciden, dando lugar a un momento dipolar y una polarización remanente en la fase ferroeléctrica. La figura 3(b) muestra los coeficientes de susceptibilidad dieléctrica  $\eta(T)$  como función de la temperatura. En la paraeléctrica, la susceptibilidad eléctrica ( $\eta_p$ ) es idéntica en todos los ejes, mientras que en la fase ferroeléctrica se vuelve anisotrópica: la susceptibilidad es diferente en los ejes  $x$  e  $y$  ( $\eta_{11}$ ) y en el eje  $z$  ( $\eta_{33}$ ). Además, en la misma figura, se observa la discontinuidad mencionada anteriormente en la polarización durante la transición entre las fases paraeléctrica y ferroeléctrica. En este punto, las propiedades dieléctricas del titanato de plomo (al igual que otros materiales ferroeléctricos con transición de fase de primer orden) cambian abruptamente cuando se alcanza la temperatura de Curie.

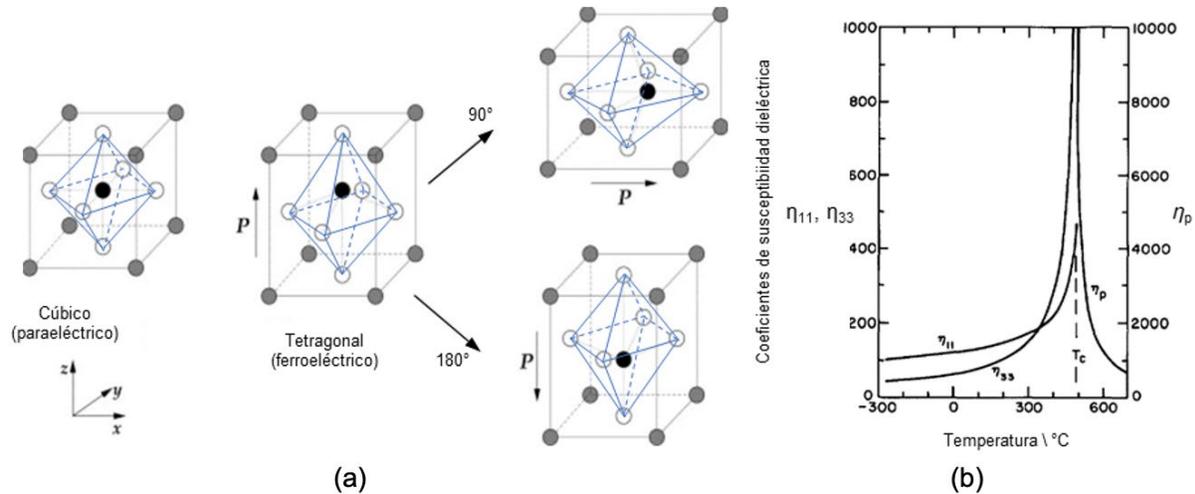


Figura 3. Transición de fase ferroeléctrica para el  $\text{PbTiO}_3$ . (a) Red cristalina en estado paraeléctrico y ferroeléctrico en donde los átomos grises en las esquinas de la celda unitaria representan Pb, los átomos blancos en el centro de la cara representan al O y el átomo negro en el centro representa al Ti [8]. Las líneas azules representan el octaedro formado por los átomos de oxígeno. (b) Coeficientes de susceptibilidad dieléctrica de las fases tetragonal ( $\eta_{11}$  y  $\eta_{33}$ ) y cúbica ( $\eta_p$ ) como función de la temperatura [9].

Debido a que la transición de fase es un proceso reproducible y reversible, la temperatura de Curie y la aparición de la transición de fase pueden estimarse de manera automatizada, mediante el cambio repentino de la señal medida de  $\eta(T)$  o  $\epsilon_r(T)$ . Este fenómeno permite utilizar la  $T_c$  como temperatura de referencia para la calibración de termómetros *in situ*. Esta idea fue presentada en la conferencia ITS-9 [7].

### Termómetro con función de autocalibración en material de referencia ferroeléctrico

El uso de materiales ferroeléctricos como referencia de calibración para termómetros presenta diversas ventajas frente a las miniceldas de punto fijo. En primer lugar, el material ferroeléctrico permanece en estado sólido durante la transición de fase, lo que facilita su manipulación y procesamiento. Además, los sensores de referencia ferroeléctricos pueden fabricarse en tamaños muy reducidos, lo que permite integrarlos fácilmente en termómetros de dimensiones y diámetros igualmente pequeños. De igual manera, la instalación de los sistemas electrónicos para detectar el estado

de polarización del material ferroeléctrico puede ser compacta, lo que da lugar a un diseño más eficiente y reducido tanto del termómetro como de su electrónica. Esta tecnología ha sido materializada en el termómetro iTHERM TrustSens TMT371/372 desarrollado por la empresa Endress + Hauser. Este dispositivo es el primer termómetro compacto del mundo que permite una calibración *in situ* automatizada, directamente en el proceso industrial. En este termómetro, el sensor de referencia ferroeléctrico se ubica junto a un sensor estándar de resistencia Pt100 en la punta del termómetro, que tiene un diámetro exterior de 3 mm, como se observa en la Figura 4. El sensor de resistencia Pt100 se utiliza para controlar continuamente la temperatura del proceso. Ambos sensores están dispuestos de tal manera que garantizan una temperatura homogénea durante su funcionamiento estático y dinámico, además de asegurar una elevada estabilidad a largo plazo.

El termómetro (con diseño compacto y electrónica integrada) es característico de los dispositivos de las industrias alimentaria y

farmacéutica. El sistema electrónico no solo realiza la medición de la temperatura, sino que también detecta la temperatura de Curie y evalúa los resultados de la calibración. La lectura de la temperatura se puede realizar mediante una interfaz analógica que varía 4 mA hasta 20 mA. Alternativamente, se puede emplear una interfaz digital HART, que permite acceder a datos adicionales como los resultados de calibración. Además, un LED indica el estado de calibración del dispositivo.

El material de referencia utilizado para la calibración es un material cerámico ferroeléctrico, con una temperatura de referencia de Curie  $T_C \approx 118 \text{ }^\circ\text{C}$ . El material específico utilizado como referencia en el termómetro está sujeto a confidencialidad empresarial; por tal motivo se utilizó el titanato de plomo para ilustrar la teoría de funcionamiento de los materiales ferroeléctricos en esta publicación. El material ferroeléctrico del termómetro se ha elegido específicamente para proporcionar una temperatura de calibración dentro del rango de temperatura del proceso de limpieza por vapor *in situ* (SIP). De este modo, el termómetro puede calibrarse en procesos típicos de las industrias alimentaria, de bebidas y farmacéutica, en los cuales se estima la desviación  $\Delta T = T_S - T_C$ , donde  $T_S$  representa la temperatura indicada por el sensor de resistencia Pt100.

La incertidumbre expandida, incluyendo el sensor de temperatura y la electrónica en condiciones de proceso es  $U(\Delta T(T_C)) = 349 \text{ mK}$ . Esta incertidumbre se obtuvo considerando 40 fuentes de incertidumbre, que se pueden agrupar en cuatro categorías: electrónica, calibración de los sensores, temperatura de referencia y condiciones ambientales o de proceso.

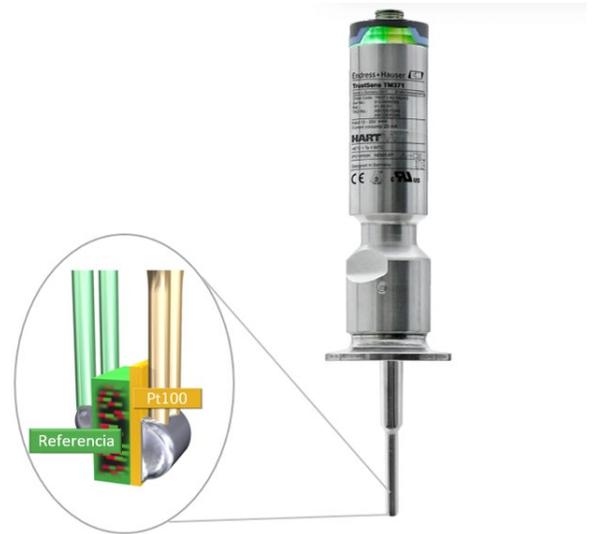


Figura 4. Termómetro con función de autocalibración iTHERM TrustSens TMT371/372 desarrollado por la compañía Endress + Hauser [10].

### Procedimiento de calibración

Las calibraciones en puntos fijos se realizan normalmente bajo condiciones térmicas estacionarias, sin embargo, esto no es posible en la transición de fase paraeléctrica a ferroeléctrica debido al pequeño calor latente asociado con la transición. Por esta razón, se emplea un procedimiento dinámico de calibración, como se muestra en la Figura 5. La transición de fase y la calibración son inducidas por un cambio en la temperatura del proceso  $T_p$ . Si esta temperatura aumenta y alcanza la temperatura de Curie  $T_C$ , el material de referencia cambia de la fase ferroeléctrica a la paraeléctrica. El cambio inverso ocurre cuando el termómetro se enfría por debajo de esta temperatura. La señal proporcional a la polarización  $S_R$ , medida como una capacitancia, indica claramente el momento exacto del cambio de fase, cuando el sensor de referencia en la punta del termómetro alcanza la temperatura de Curie. En ese instante, la lectura del sensor de temperatura Pt100,  $T_S$ , se compara con la temperatura conocida de Curie y se calcula la diferencia  $\Delta T = T_S - T_C$ . El resultado de la calibración es entonces  $\Delta T = \Delta T \pm 349 \text{ mK}$ .

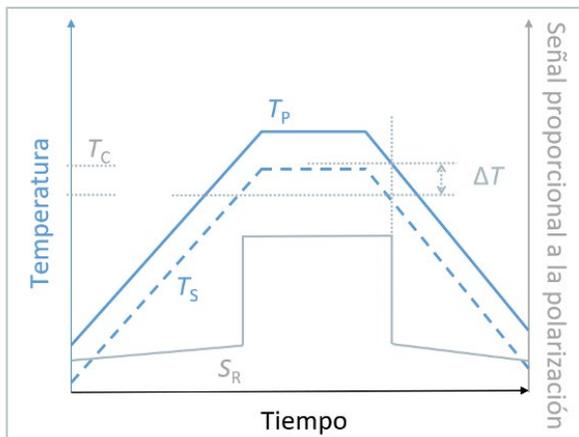


Figura 5. Gráfica esquemática de las señales durante una transición de fase con temperatura de proceso  $T_P$  (línea continua azul), temperatura indicada por el sensor Pt100  $T_S$  (línea discontinua azul) con desviación de medición  $\Delta T$  y señal de referencia  $S_R$  (línea continua gris).

Esta calibración se lleva a cabo automáticamente durante un ciclo de enfriamiento, cuando la temperatura del proceso desciende por debajo de la temperatura de Curie, como ocurre, por ejemplo, en cada ciclo de limpieza SIP. Durante el proceso de calibración, el termómetro realiza una evaluación interna para asegurarse de que las condiciones del proceso sean adecuadas para garantizar la incertidumbre de medición. Si la evaluación es positiva, se acepta el valor de calibración y se genera un certificado. El LED indica mediante luz verde o roja si el  $\Delta T$  está dentro o fuera de una tolerancia definida por el usuario.

## VALIDACIÓN DE LA FUNCIÓN DE CALIBRACIÓN

La validación de la función de calibración automática del termómetro se llevó a cabo primero en pruebas de laboratorio y posteriormente en procesos industriales. En las pruebas de laboratorio también se evaluó la estabilidad a largo plazo de los termómetros. Para ello, se sometieron diez termómetros a ciclos térmicos en un baño de calibración, con un intervalo de temperatura que abarcó el rango de trabajo operativo del termómetro,

desde 30 °C hasta 160 °C. Las mediciones se realizaron por un periodo de aproximadamente 1.5 años, registrando automáticamente cerca de 2500 transiciones de fase para cada termómetro. Los resultados se muestran en la Figura 6.

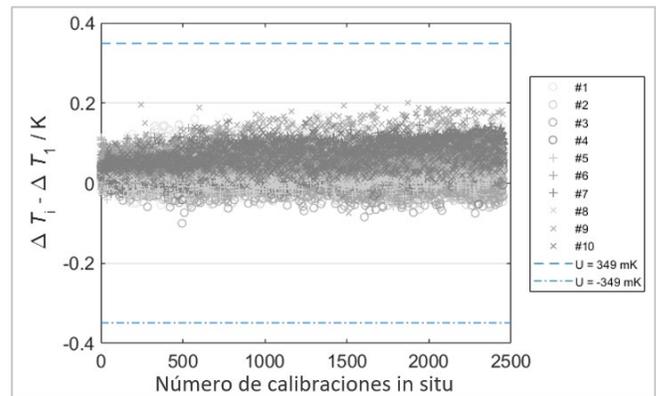


Figura 6. Resultados de una medición a largo plazo de 1.5 años. Para cada uno de los diez termómetros sometidos a la prueba se obtuvieron alrededor de 2500 calibraciones automáticas.

En la Figura 6 puede observarse también una alta reproducibilidad de los resultados de calibración, con una desviación estándar inferior a 45 mK para cada uno de los termómetros. Esto demuestra que los resultados se encuentran dentro de los límites de la incertidumbre previamente calculados, lo que a su vez confirma la estabilidad a largo plazo de la temperatura de Curie  $T_C$  del material de referencia y de la lectura de la temperatura  $T_S$  del sensor de resistencia Pt100.

Las pruebas anteriores se realizaron en condiciones de laboratorio, donde los ciclos térmicos que inducen la transición de fase ocurrieron en un ambiente controlado. Sin embargo, en aplicaciones industriales, la transición de fase se desencadena por la temperatura del medio del proceso industrial, la cual varía de acuerdo con el funcionamiento específico de la planta o instalación. Por esta razón, se llevaron a cabo varios ensayos de

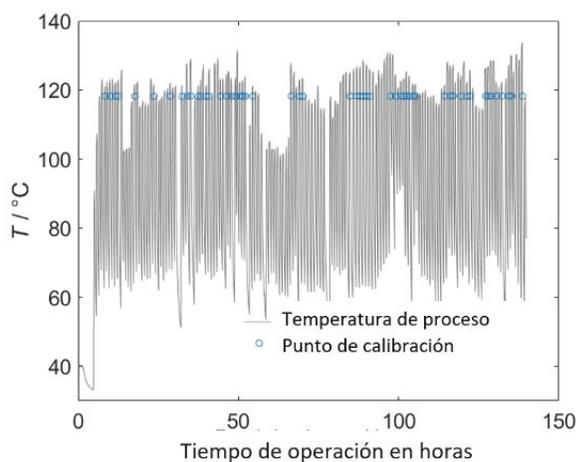
campo en diferentes procesos industriales para evaluar el desempeño de los termómetros en aplicaciones reales.

En el primer ejemplo, el termómetro fue instalado en una planta productora de aceite comestible, con un tiempo operativo de 6 días, bajo condiciones de proceso industrial heterogéneas. Las temperaturas del proceso fluctuaron rápidamente en un intervalo desde la temperatura ambiente hasta una temperatura máxima de 135 °C, como se puede observar en la Figura 7(a). A pesar de estas variaciones, se alcanzó la temperatura del punto de calibración en varias ocasiones y el termómetro realizó un total de 53 calibraciones automáticas, representado en la figura con los círculos azules.

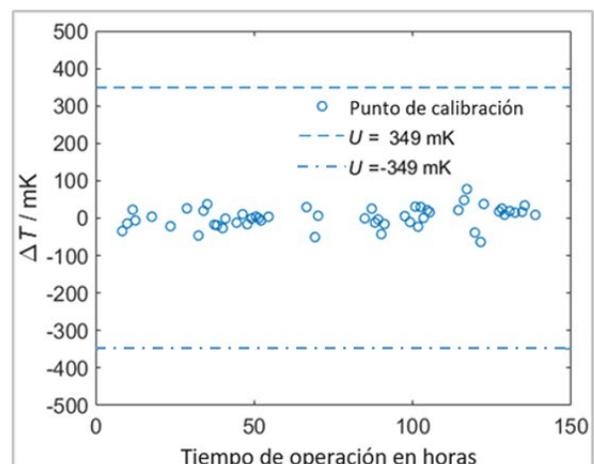
La incertidumbre de calibración solo puede garantizarse si la temperatura del proceso se encuentra dentro de las condiciones especificadas durante su definición. Para ello, se requiere un calentamiento inicial de 3 K por encima de la  $T_c$  y una velocidad de enfriamiento entre -0.5 K/min y -16.5 K/min. Un

algoritmo de monitoreo interno comprueba que las condiciones del proceso se mantengan dentro de las tolerancias especificadas para cada calibración. En la Figura 7(a), se pueden observar algunos ciclos de temperatura en los que no se realizó ninguna calibración. En estos casos, el algoritmo del termómetro detectó que las condiciones del proceso estaban por fuera de la tolerancia definida y, como resultado, la calibración fue rechazada. Los puntos de calibración aceptados se muestran en la Figura 7(b). Estas calibraciones fueron altamente reproducibles, con una desviación estándar  $s(\Delta T) = 29$  mK, que es del mismo orden de magnitud que la desviación estándar estimada en las pruebas de laboratorio.

Se llevó a cabo una prueba de campo adicional en un autoclave utilizado en la producción farmacéutica. En este caso, se realizó un proceso de esterilización periódica con una temperatura máxima de aproximadamente 125 °C, como se muestra en la Figura 8(a). Se realizaron 81 calibraciones durante un periodo de 25 días, como se observa en la Figura 8(b). Todos los resultados estuvieron

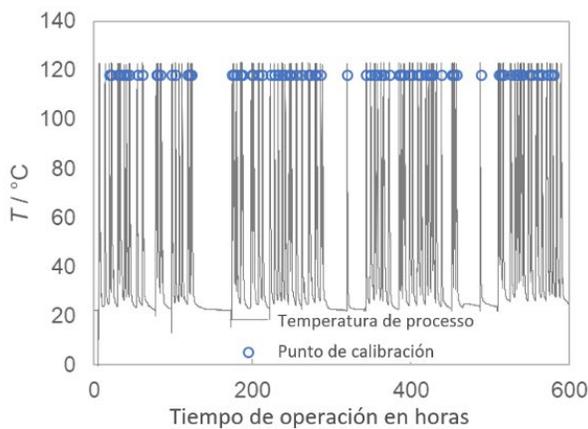


(a)

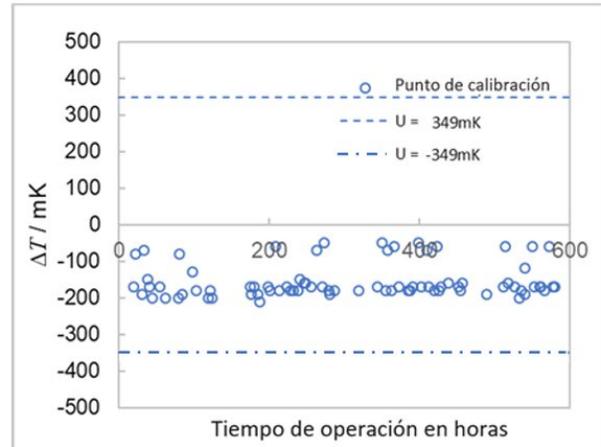


(b)

Figura 7. Resultados de medición de una prueba de campo en una fábrica productora de aceite comestible. (a) Secuencia de la temperatura de proceso con puntos de calibración detectados (círculos azules). (b) Puntos de calibración detectados automáticamente.



(a)



(b)

Figura 8. Resultados de las mediciones de un ensayo de campo en un autoclave de producción farmacéutica. (a) Secuencia de la temperatura de proceso con puntos de calibración detectados (círculos azules). (b) Puntos de calibración detectados automáticamente.

dentro de la incertidumbre de medición del termómetro, con una desviación estándar  $s(\Delta T) = 46 \text{ mK}$ .

Los resultados de campo refuerzan las conclusiones de las investigaciones de laboratorio y demuestran que el termómetro iTHERM TrustSens TMT371/372, con función de auto-calibración y referencia ferroeléctrica, es apto para realizar calibraciones automáticas *in situ* en el proceso industrial, utilizando la temperatura de Curie del material de referencia.

## CONCLUSIONES

La temperatura es un parámetro relevante para garantizar la calidad y la seguridad de los procesos industriales, por lo que debe ser monitoreada y controlada constantemente. Los termómetros usados para esta tarea requieren calibraciones periódicas para minimizar los riesgos derivados de las desviaciones no detectadas durante las mediciones.

En este artículo se presenta un enfoque de calibración *in situ* para termómetros, utilizando la temperatura de Curie de un material ferroeléctrico como referencia de calibración

con trazabilidad metrológica. Esta solución ofrece una alternativa más compacta y estable a largo plazo en comparación con las tecnologías actuales, garantizando una producción constante y sin interrupciones, lo que a su vez reduce el costo de calibración durante el proceso industrial.

El material ferroeléctrico como referencia de calibración fue incorporado en el termómetro iTHERM TrustSens TMT371/372, el primer termómetro de proceso compacto del mundo con una función de calibración integrada. En el proceso de calibración *in situ* propuesto, se generan automáticamente los resultados de calibración con la correspondiente incertidumbre de medición, lo que permite evaluar la calidad y estabilidad de la temperatura indicada por el sensor.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las contribuciones de los colegas de Endress + Hauser Wetzler GmbH & Co. KG y de la Technische Universität Ilmenau, que tuvieron una amplia y valiosa participación en el desarrollo y la investigación del principio de medición del dispositivo.

## Referencias

- [1]. H. Preston-Thomas, *Metrologia*, 27, 3-10 (1990).
- [2]. Consultative Committee for Thermometry, *Guide to Secondary Thermometry* (Bureau International des Poids et Mesures, [www.bipm.org](http://www.bipm.org), 2022)
- [3]. G. Failleau et al., *International Journal of Thermophysics* 35, 1223-1238 (2014)
- [4]. F. Bernhard and H. Mammen, "Application of Self-Calibrating Thermometers with Miniature Fixed-Point Cells in a Temperature Range from 300 °C to 650 °C" in *TEMPMEKO 2004 conference proceedings*, edited by D. Zvizdic (Laboratory for Process Measurement, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 2004)
- [5]. O. Ongrai et al., in "Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry Vol. 8", edited by C. W. Meyer (National Institute of Standards and Technology, Maryland, USA, 2013), pp. 504-509
- [6]. J.V. Pearce et al., *Measurement Science and Technology* 30(12), (2019), p. 124003
- [7]. M. Schalles et al., in "Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry Vol. 8", edited by C. W. Meyer (National Institute of Standards and Technology, Maryland, USA, 2013), pp. 937-942.
- [8]. E.B. Tadmor et al., *Acta Materialia* 50(11), 2989-3002, (2002)
- [9]. M.J. Haun et al., *Journal of Applied Physics* 62(8), 3331-3338, 1987
- [10]. Endress+Hauser. Sanitary RTD - iTHERM TrustSens TM371. 2023; Disponible en: <https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-temperatura/TrustSens-TM371-aplicaciones-higienicas?ii-country=es&locale=es&t.tabId=product-overview>

# Biomateriales para medicina regenerativa I

Ma. Cristina Piña Barba, Israel Alfonso Núñez Tapia, David Eduardo Abad Contreras, Ángela Míscali Rangel García, Daniel Michell Padilla Ramos, Ricardo Mercurio Jiménez Jiménez, Luis Ariel Ruiz García

Instituto de Investigaciones en Materiales, IIM-UNAM. Circuito de la, Circuito Exterior, Investigación Científica S/N, CU, 04510 Ciudad de México, CDMX  
[mcpb@unam.mx](mailto:mcpb@unam.mx)

En este reporte queremos dar a conocer lo que actualmente se está desarrollando en el Laboratorio de Biomateriales del IIM-UNAM, con la finalidad de que los estudiantes interesados en nuestros temas puedan venir y participar con nosotros en los diferentes proyectos con los que contamos.

## Introducción

Normalmente, cuando nos sentimos bien, no visitamos nunca al médico. Esto lo hacemos cuando nos sentimos mal, cuando nos duele algo (o no nos funciona como se espera que lo haga), cuando sentimos dolor, cuando nos da fiebre, cuando nos sentimos deprimidos o no podemos dormir. Es ahí que pensamos en una visita al médico. Pero, ¿con cuál médico debo ir? Es correcto visitar a un médico general, este nos remitirá con un especialista en caso de ser necesario.

La definición de la Organización Mundial de la Salud fue dada en 1946 y dice:

*“La salud es un estado de bienestar físico, mental y social. Nos permite tener alta eficacia de funcionamiento tanto a nivel micro (celular), como a nivel macro (social) y en armonía con el medio ambiente, no es solo la ausencia de afecciones o enfermedades”.*

Esto implica que la salud es el estado de adaptación de una persona al medio donde se encuentra, si una persona es sana, tiene la capacidad de convertirse en lo que quiere ser, puede lograr los objetivos que se proponga. Para facilitarnos el trabajo podemos tratar el estudio de la salud desde diferentes aspectos: física, mental, psicológica, social, etc. En este trabajo, lo primero que tenemos que aclarar es que las afecciones mentales, psicológicas y/o sociales producen afecciones físicas reales, y no podemos distinguir (los que no somos médicos) el tipo de afección que origina los efectos físicos, que son el motivo de nuestro trabajo.

Cuando un órgano o un tejido deja de funcionar correctamente o bien se ve afectado (o muerto por alguna causa) es cuando acudimos a la Medicina Regenerativa, en la cual se usan biomateriales.

La Medicina Regenerativa busca regenerar órganos y/o tejidos que se encuentran dañados o que no funcionan correctamente. Para ello recurre a diferentes técnicas o procesos, como puede ser la llamada Ingeniería de Tejidos (IT), que consiste en hacer un andamio celular (hecho a base de biomateriales, naturales o sintéticos) al cual se le agregan células sanas

que pueden ser del mismo paciente o de un donador compatible, factores de crecimiento, nanopartículas (las de plata evitan la proliferación de bacterias) y se pueden agregar otro tipo de moléculas, como por ejemplo antivirales.

Un biomaterial es un material que tiene la capacidad de ser aceptado o tolerado cuando está en contacto o implantado en un organismo, puede ser de origen sintético o natural. Si una persona o animal sufre un daño en un tejido o en un órgano, la capacidad de auto reparación varía según la magnitud del daño y las condiciones de salud del paciente. Mientras que lesiones menores pueden restablecerse naturalmente, daños extensos como la pérdida significativa de hueso a menudo requieren la intervención de biomateriales. Estos tienen la capacidad de asumir funciones de los órganos o tejidos que reemplazan [1].

Los biomateriales deben cumplir con exigencias específicas:

- Biocompatibilidad (no deben provocar rechazo por toxicidad)
- No deben ser carcinógenos
- Deben ser estables químicamente
- Propiedades mecánicas apropiadas
- Tiempo de degradación adecuado
- Diseño de ingeniería funcional (tamaño, forma y acabado deben ser adecuados y personalizados para cada caso)
- Económicos, reproducibles y fáciles de fabricar para su producción a gran escala

Cada uno de estos requisitos implica pruebas específicas mediante el uso de técnicas especializadas.

### Uso y aplicaciones de biomateriales

La Medicina Regenerativa del siglo XXI ya no busca sustituir la parte dañada del organismo, tampoco busca reparar un órgano o un tejido,

lo que se busca es su regeneración. Para ello se hace uso de andamios celulares que son estructuras porosas que llevan células sanas del paciente o bien de un donador compatible, al órgano o al tejido que haya que regenerar, colocándolo de manera adecuada para que esto suceda. El principal uso de los biomateriales ahora es en la fabricación de andamios celulares [2].

La IT es el procedimiento que utiliza la Medicina Regenerativa para llevar a cabo dicha regeneración, consiste en sacar células sanas del paciente del órgano o tejido a regenerar y colocarlas en un andamio celular. Si el paciente no tiene esta posibilidad, se pueden usar células madre o bien, células troncales que den origen a dicho tejido [3].

La IT es una técnica para construir andamios funcionalizados. En la Figura 1 se muestra a una paciente (A), que en principio adolece de un tejido o un órgano afectado. Por medio de una intervención quirúrgica menor realizada en la cadera se pueden obtener células madre mesenquimales (CMM) (B). Las CMM son células madre multipotentes que se encuentran en la médula ósea, son importantes para fabricar y reparar tejido esquelético, como el cartílago, el hueso y la grasa de la médula ósea. Las células madre se pueden cultivar en monocapa o en esferoides (D) y (D'), las cuales se insertan en los andamios preparados por impresión 3D (E y E') o por electrohilado (F y F'). Estos se cultivan hasta estar totalmente ocupados por CMM, una vez teniendo esto, se implanta en la paciente para la regeneración del tejido afectado. A la derecha se muestran andamios con células en 1, 2 y 3 dimensiones.

En el ámbito de la IT, el Laboratorio de Biomateriales del IIM se encuentra actualmente inmerso en diversas investigaciones, como la

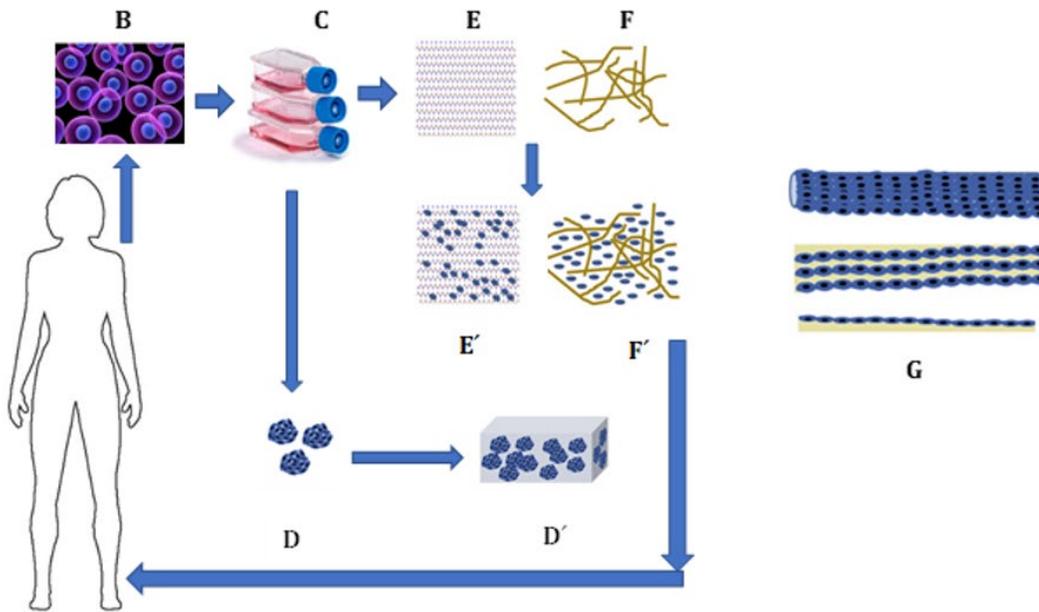


Figura 1. Representación de las diferentes etapas aplicadas en la ingeniería de tejidos.

obtención de biomateriales de origen marino, la obtención de órganos y tejidos mediante técnicas de descelularización y recelularización para la Medicina Regenerativa, así como la obtención de membranas por impresión 3D y electrohilado. Estos avances representan un paso importante hacia soluciones innovadoras y personalizadas en el campo de la Medicina Regenerativa.

### Obtención de órganos y tejidos por descelularización y recelularización

La descelularización es un conjunto de técnicas que implica la eliminación de células de un tejido u órgano sin dañarlo y ha sido un avance revolucionario en la ingeniería de tejidos. Hoy es posible eliminar las células de un órgano humano dejando una estructura tridimensional que conserva su matriz extracelular (MEC) única, llamado andamio [4].

La MEC es una red de soporte, que está presente en todos los órganos y tejidos del cuerpo humano. Constituye un filtro biofísico de protección, nutrición e inervación celular, además

del terreno idóneo para la respuesta inmune, angiogénesis, fibrosis y regeneración tisular. Está configurada por complejos fundamentales de proteínas y carbohidratos que permiten restablecer un microambiente óptimo, indispensable para la organización y comunicación inter e intracelular (Figura 2) [5,6].

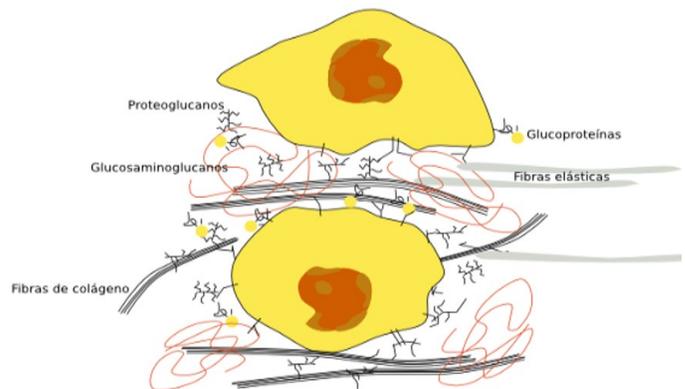


Figura 2. Componentes y organización de la matriz extracelular.

La descelularización inicia con la selección del tejido u órgano de interés, que puede provenir de diversas fuentes como cadáveres, donantes vivos o incluso tejido animal. El tejido se somete a un proceso en el cual se eliminan

meticulosamente todas las células presentes y los remanentes que pueden quedar de ellas, dejando únicamente una matriz extracelular tridimensional que conserva la arquitectura y las señales bioquímicas características [7,8].

Con estas técnicas se plantea la posibilidad de aprovechar todas las bondades de la MEC sin la necesidad de fabricar un andamio sintético que trate de imitar algunas de sus propiedades, terreno en el que la ingeniería de tejidos sigue avanzando en paralelo. Es por eso por lo que grandes esfuerzos de los científicos a cargo de estos proyectos, se centran no solo en la eliminación del material celular de los andamios, sino en la preservación de todas las características y componentes posibles de la MEC [5,9].

Los métodos de descelularización varían según el tipo de tejido y la aplicación específica. Algunas técnicas utilizan detergentes o soluciones salinas, mientras que otras se basan en enzimas o procesos físicos, como la presión y la temperatura controladas. La elección del método adecuado es crucial para mantener la integridad de la MEC, ya que un proceso inadecuado podría dañar la estructura y reducir la eficacia de la posterior recelularización [10,11].

La descelularización ha desencadenado una revolución en la ingeniería de órganos y tejidos al proporcionar andamios biológicos que pueden servir como plantillas para la regeneración celular. Algunas de sus aplicaciones más notables incluyen:

1) Trasplantes de órganos personalizados: la descelularización ofrece la posibilidad de crear órganos a medida a partir de la MEC de un donante compatible. Esto podría eliminar la necesidad de largas listas de espera para trasplantes y reducir el riesgo de rechazo [12].

2) Medicina regenerativa: la MEC se puede poblar con células que tengan la capacidad de diferenciarse en los tipos celulares necesarios. Esto es particularmente prometedor en la reparación de tejidos dañados, como el cartílago o el tejido cardíaco [13].

3) Investigación biomédica: los andamios de órganos y tejidos descelularizados se utilizan como modelos en estudios preclínicos para comprender mejor las interacciones celulares y el desarrollo de terapias avanzadas [14].

4) Avances en la terapia génica: la MEC puede ser utilizada como vector para la entrega de terapias génicas, abriendo nuevas vías en el tratamiento de enfermedades genéticas [15].

Hasta ahora hemos explorado la descelularización, un proceso esencial en la IT que nos ha proporcionado una base sólida: la MEC libre de células. Sin embargo, estos andamios no son suficientes para regenerar o reemplazar tejidos y órganos funcionales. Aquí es donde entra en juego la recelularización, un proceso igualmente fascinante que completa el rompecabezas de la ingeniería de tejidos.

La recelularización es el proceso de repoblar un andamio de tejido descelularizado con células funcionales. Esta etapa crítica implica la reintroducción de células vivas específicas en la matriz extracelular, de manera que puedan proliferar, diferenciarse y desempeñar sus funciones biológicas normales. Las células utilizadas para la recelularización pueden ser de diferentes fuentes, como células mesenquimales (células madre) o células especializadas obtenidas del propio paciente o de un donante compatible. La elección de las células adecuadas es esencial, ya que determina la funcionalidad final del tejido o el órgano recelularizado [16]. Gracias a la intersección de la biología celular y la ingeniería de tejidos se han podido desarrollar tecnologías prometedoras

para regeneración tisular. Algunos desarrollos notables incluyen [17-20].

1. **Impresión 3D de tejidos:** la tecnología de impresión 3D permite la deposición precisa de células en la MEC, creando estructuras complejas con una distribución celular controlada. Se pueden imprimir andamios utilizando MEC como biotinta y en algunos casos agregando células funcionales al andamio final.

2. **Biología sintética:** la ingeniería genética se utiliza para modificar células con fines terapéuticos, lo que lleva a una funcionalidad mejorada y adaptada a las necesidades específicas del paciente. Tratando diversos padecimientos con el uso de un solo andamio de MEC.

3. **Biorreactores avanzados:** los sistemas de cultivo celular en biorreactores permiten un ambiente de crecimiento óptimo para las células, lo que aumenta la eficacia de la recelularización. Existen tecnologías que controlan el flujo de nutrientes, las características mecánicas y las condiciones ambientales, entre otros parámetros, que permiten una repoblación celular óptima del andamio.

4. **Control de señales bioquímicas:** se investiga la manipulación de señales bioquímicas para guiar la diferenciación celular y mejorar la funcionalidad del tejido recelularizado.

La recelularización ha demostrado ser efectiva en la regeneración de diversos tejidos y órganos. Es importante mencionar que es una ciencia que está en constante desarrollo y cada día los descubrimientos y teorías que surgen alrededor de ella mejoran la comprensión de los tejidos biológicos y amplían la discusión multidisciplinaria a su alrededor.

### **Biomateriales de origen marino**

Los biomateriales pueden ser de origen sintético y natural, los biomateriales de origen natural pueden clasificarse en biomateriales

de origen marino y de origen terrestre. El medio marino, con su alta presión, salinidad, baja temperatura y limitada exposición a la luz solar, alberga una riqueza de materiales únicos. Moluscos, algas, corales y otros organismos marinos han desarrollado polisacáridos dentro de su composición, con propiedades excepcionales, convirtiéndolos en candidatos ideales para su extracción y usos biomédicos, como anticoagulantes, antimicrobianos, antioxidantes, antitrombóticas y antitumorales [21].

Diversos organismos marinos, como peces, esponjas y medusas, poseen distintos tipos de colágeno, extraíbles de diferentes partes de su organismo, como la piel, aletas, escamas y tentáculos. La hidroxiapatita (una biocerámica ampliamente utilizada en ortopedia, cirugía maxilofacial, dental y reconstructiva) puede obtenerse de conchas, corales y escamas de peces [22]. Las técnicas de extracción de materiales marinos dependen del biomaterial objetivo y la materia prima utilizada. La primera etapa implica la separación y reducción de tamaño de las muestras, facilitando la limpieza y eliminación de material extraño.

La preparación de las muestras busca conservar la materia prima y eliminar proteínas, carbohidratos, lípidos, minerales y pigmentos ajenos al biomaterial. Por ejemplo, en la obtención de carragenanos, ulvanos y alginatos, es esencial eliminar los pigmentos de las algas antes de la extracción. La etapa de extracción varía según el biomaterial. Por ejemplo, el colágeno se extrae con ácido acético, mientras que el quitosano requiere una extracción termoalcalina. Los ulvanos del sargazo se extraen con una solución de NaOH. La recuperación y purificación buscan obtener el biomaterial lo más puro posible, aplicando métodos de precipitación selectiva y diálisis para eliminar residuos de solventes.

La complejidad aumenta al considerar ajustes necesarios según la especie utilizada. Hay 300 especies de camarones para obtener quitosano, 600 especies de algas rojas para carragenanos y 32 000 especies de peces comestibles para extraer colágeno. La metodología exacta queda fuera del alcance de este trabajo, pero estas investigaciones prometen avances significativos en el uso de biomateriales marinos en aplicaciones biomédicas [23].

### Aplicaciones de los biomateriales de origen marino

La ingeniería de tejidos ayuda a restaurar, mantener o mejorar la función de tejidos u órganos dañados o perdidos debido a traumatismos o enfermedades. Los biomateriales marinos se han utilizado ampliamente en ingeniería tisular debido a su baja inmunogenicidad y buena biocompatibilidad [24]. 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. La deficiencia mecánica de los andamios obtenidos a partir de biomateriales marinos es subsanada al combinarlos con polímeros sintéticos biocompatibles como PLA, PCL, PLGA [25].

La amplia aplicación de los biomateriales marinos también incluye la investigación en tratamientos como la artrosis, la diabetes y las úlceras del pie diabético [26]. Los biomateriales marinos pueden ser usados en una amplia gama de industrias, desde la ingeniería hasta las aplicaciones farmacéuticas y cosméticas. Los polisacáridos de origen marino se utilizan en tratamiento de aguas residuales, cosméticas y papeleras [27].

La carragenina se utiliza en la industria alimentaria, los productos farmacéuticos, la inmovilización de enzimas. El alginato y el agar también se utilizan en varias áreas industrializadas, como la alimentación [28]. Las amplias posibilidades de aplicación de materiales de origen marino, presentan retos, como la conservación del medio marino, el desarrollo de técnicas de extracción y purificación. El alginato de calcio que se extrae de las algas pardas es una sustancia no tóxica, se puede comer e incluso se usa en alta cocina en el mundo entero. También puede absorber grandes cantidades de exudado producido por bacterias en las heridas, favoreciendo la cicatrización y la reepitelización de la piel. Se ha demostrado que el alginato de calcio combate a los virus del tipo Sars-CoV-2, este estudio se llevó a cabo en España, en Valencia.

Los organismos marinos como algas, moluscos, corales, estrellas, crustáceos, esponjas y peces pueden generar compuestos bioactivos como alcaloides, antraquinonas, péptidos, polisacáridos, polipéptidos y terpenos, todos tienen aplicaciones en la industria farmacéutica.



Figura 3. Alginatos para la producción de fármacos.

## Manufactura aditiva (MA)

La MA es una tecnología cuya finalidad es obtener estructuras tridimensionales previamente diseñadas por computadora, al superponer varias capas de material. En algunos casos se trata de agregar material en estado sólido o semisólido, mientras que en otros la materia prima se puede encontrar en polvo, en fase líquida o en una suspensión. En cuanto a la creación de las capas constituyentes de la estructura final, estas se densifican de manera selectiva utilizando diferentes fuentes de energía o, en algunos casos, reticulantes químicos.

Entre las técnicas más conocidas para conseguir estas estructuras son: Modelado por deposición en fundido (FDM), que se basa en la extrusión de un filamento formado por un polímero termoestable; Sinterizado láser selectivo (SLS) y Fundido láser selectivo (SLM), que utilizan polvo como sustrato para la impresión; Estereolitografía, que se basa en el curado de resinas líquidas fotosensibles; Binder Jetting, que consiste en la deposición de un agente aglutinante adhesivo sobre finas capas de material en polvo, y Polyjet, que tiene el principio de las impresoras de chorro de tinta y funciona

lanzando un chorro de resina (fotopolímero líquido) curable con luz UV sobre una bandeja de construcción.

A grandes rasgos, el mismo proceso se mantiene consistente en las diversas técnicas de impresión, aunque es importante destacar que cada una presenta sus propias características distintivas (Figura 4). Para su aplicación médica, el primer paso consiste en diseñar el objeto con las geometrías apropiadas para el paciente, este diseño se hace por medio de tomografías o softwares específicos para el diseño de objetos tridimensionales [29].

El segundo paso implica realizar una conversión de la representación del objeto en un formato ".stl", que se ha convertido en un estándar universal compatible con todas las impresoras de este tipo. El propósito principal de este paso es simplificar el diseño para su manejo sencillo en la computadora, transformando el objeto en una estructura compuesta por polígonos simples, como triángulos, cuadrados, pentágonos, hexágonos, etc. Un ejemplo de esto es un balón de fútbol, que es una esfera que está hecha a partir de pentágonos y hexágonos.

## ETAPAS DE LA MANUFACTURA ADITIVA



Figura 4. Diagrama de las etapas del proceso de impresión 3D.

El paso tres, consiste en definir las variables de impresión, como densidad de relleno, velocidad de impresión, posición de la pieza en la plataforma de impresión, etc. El paso cuatro consiste en la calibración de la impresión, para evitar la adherencia de las capas a la plataforma. El retirado de la pieza de la plataforma (paso 5), debe ser muy cuidadoso, en algunos casos se hace uso de soportes y herramientas como cuñas o espátulas, o de plataformas con superficies antiadherentes, que facilitan la extracción de la muestra sin que sufra daños.

Dependiendo de la técnica y el material, en ocasiones es necesario un sexto paso el cual consiste en un postproceso de la pieza. Esto depende del tipo de impresora y del material que se esté empleando, ya que este postproceso puede consistir en hornear la pieza o fotocurado con luz UV. Y finalmente, el último paso es la obtención de la pieza.

### Manufactura aditiva en ingeniería de tejidos

Los andamios impresos en 3D para regenerar órganos y tejidos proporcionan una gran solución. Se pueden realizar de forma rápida, con tratamientos personalizados a partir de células de pacientes y minimizar el riesgo de rechazo de órganos tras la implantación, por lo que su desarrollo y aplicaciones han ido en constante aumento durante los últimos años (y con ello la necesidad de crear nuevos materiales que proporcionen las propiedades requeridas para una impresión exitosa).

Uno de los puntos críticos es la selección o diseño del biomaterial con el cual serán elaborados los andamios obtenidos con impresión 3D, ya que esta depende de la aplicación que tendrán, en el caso de regenerar tejidos óseos, por lo general se utiliza una combinación de

cerámicas con biopolímeros. Para el caso de tejidos suaves se utilizan diversos tipos de biopolímeros.

Además, estos materiales deben cumplir ciertas características para poder ser procesados por las distintas técnicas de MA. En el caso de las resinas se deben elegir materiales con la capacidad de ser fotocurados con luz UV o poder ser modificados químicamente para obtener esta propiedad. En el caso de los filamentos, estos deben tener un comportamiento térmico y reológico apropiado para el proceso de extrusión.

Por otro lado, en el ámbito de la impresión 3D, hay una propiedad con la cual es posible evaluar qué tan prometedor es un material para poder ser impreso, la llamada *printability* [30]. *Printability* es la capacidad de un material para ser usado de forma efectiva en un proceso de impresión 3D [31]. Este concepto engloba varios factores de la respuesta del material al proceso de impresión, como la viscosidad, concentración del material, tiempo de endurecimiento, adherencia a la plataforma, diseño del andamio y velocidad de impresión [32]. En el caso de la técnica de extrusión también se considera la cantidad de material en el tubo contenedor, calibre de la boquilla de impresión, separación de la boquilla a la plataforma de impresión, temperatura de la tinta y de la plataforma de impresión, presión del proceso de impresión, etc. Evaluar estas propiedades del material permite garantizar un proceso de impresión exitoso, además de ser un aspecto crítico para el avance del diseño de nuevos materiales para la impresión y su aplicación en la medicina regenerativa.

El electrohilado es una técnica de obtención de fibras cuyas aplicaciones son potenciales y diversas. El funcionamiento del proceso se basa en la interacción entre un polímero di-

suelto y un fuerte campo eléctrico. Mediante la elección de materiales y parámetros adecuados, el electrohilado permite modificar la arquitectura y las propiedades superficiales de las fibras que provee. Un sistema convencional de electrohilado está conformado por cuatro elementos principales: un dispositivo colector de fibras, una fuente de alto voltaje, una bomba inyectora y una jeringa con aguja [33]. La función de la jeringa es la de almacenar la sustancia que se desea electrohilar, la bomba inyectora provee un flujo constante de dicha sustancia a través de la aguja [34].

Por otro lado, la fuente de alto voltaje induce una carga sobre la superficie de la solución que se encuentra a la salida de la aguja. Cuando dicha carga es lo suficientemente grande, la superficie del líquido se elonga y el cono de Taylor toma lugar [35]. Si la tensión superficial es superada por el campo eléctrico aplicado, la solución es eyectada desde la aguja, estirada, acelerada y atraída por el colector, el cual está conectado a la tierra. Durante este recorrido,

el solvente de la solución polimérica se evapora y las fibras ya secas se concentran en el colector (Figura 5) [36].

La deposición constante de dichas fibras resulta en la formación de una membrana cuya arquitectura constituye un andamiaje similar a la matriz extracelular natural [37]. Diversos factores intervienen directamente en el proceso de electrohilado. Para clasificarlos, se agrupan en tres categorías principales: configuración del sistema, características de la solución y condiciones ambientales. Contemplar los efectos de cada uno de los factores es esencial para obtener fibras libres de defectos [38].

## Aplicaciones

En México, el grupo del Laboratorio de Biomateriales del IIM-UNAM, es pionero en la obtención, desarrollo y aplicación de los biomateriales en ingeniería de órganos y tejidos [39]. En los últimos años ha tenido resultados prometedores gracias a colaboraciones con Institutos Nacionales del Sector Salud para

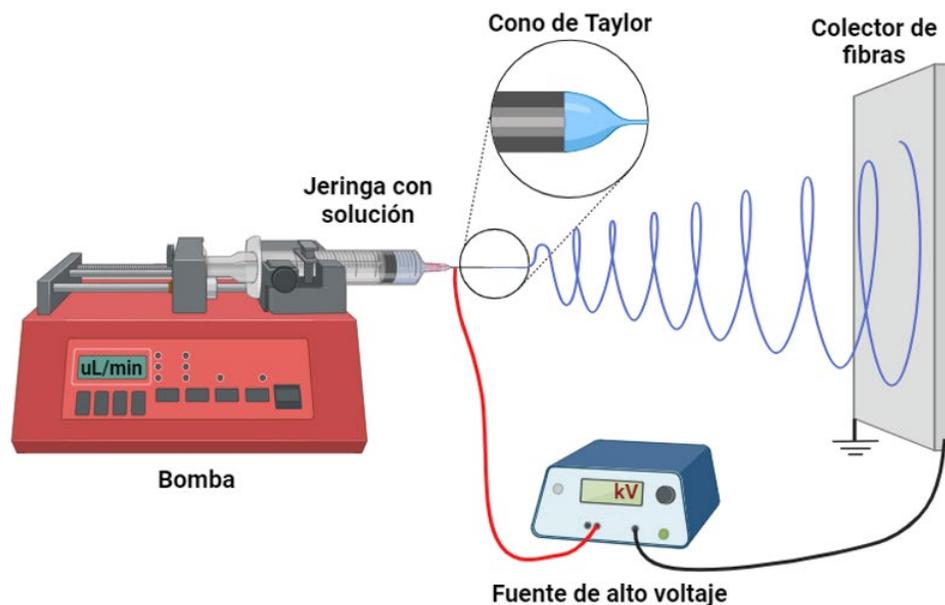


Figura 5. Configuración de un sistema convencional de electrohilado.

buscar una recelularización adecuada en diferentes órganos y tejidos (Figura 6). Siempre buscando una ciencia multidisciplinaria que pueda ayudar a la gente y al desarrollo de la sociedad [40].

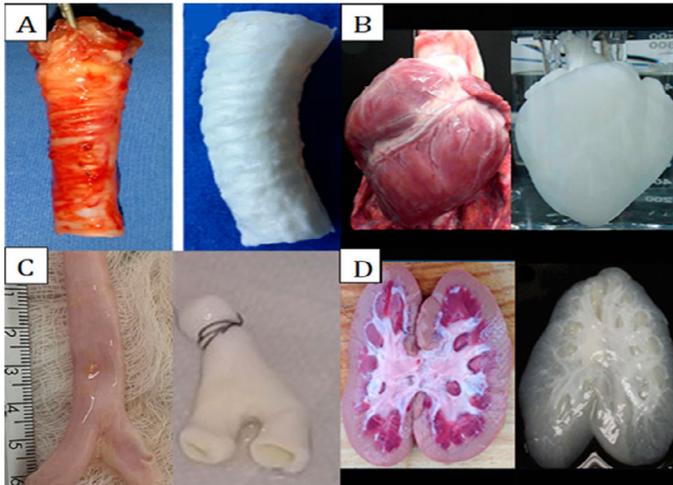


Figura 6. Órganos nativos y descelularizados: (A) tráquea porcina, (B) corazón porcino, (C) arteria humana y (D) riñón porcino.

Uno de los materiales por excelencia que se utilizan en andamios en la IT es la colágena, la cual se puede definir como una familia de proteínas de las que hasta ahora se conocen más de 20 tipos diferentes de colágena en el cuerpo humano [41]. Entre sus desventajas está que tiene una alta tasa de degradación, en otras palabras, los andamios elaborados al cien por ciento de colágena tienen un tiempo de vida corto, además de ser estructuralmente débiles.

Es por eso por lo que es fundamental el desarrollo de tintas para su uso en la IT. Por lo general se usa una combinación de diversos biopolímeros para obtener las mejores propiedades de ellos. Además, el solvente elegido debe cumplir con criterios adicionales: debe tener la capacidad de disolver todos los biopolímeros involucrados, no debe ser citotóxico y debe permitir una evaporación eficiente. Esto último es esencial para evitar la acumulación de solventes en los andamios resultantes.

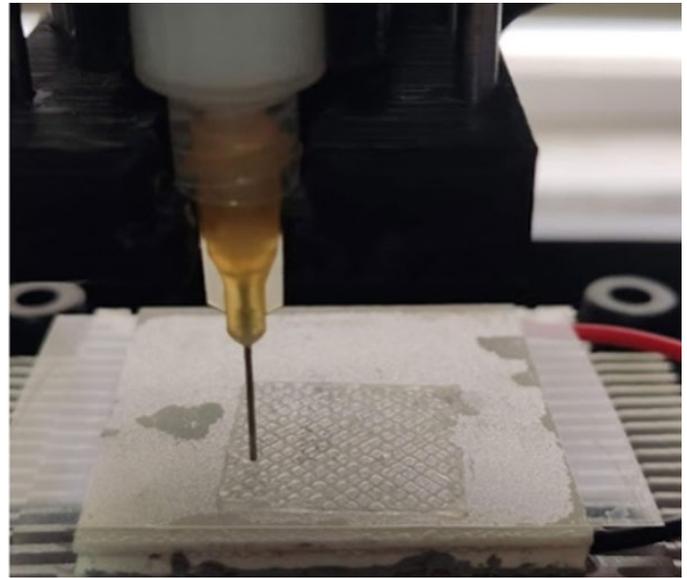


Figura 7. Impresión de una tinta para obtener andamios para regenerar piel.

La importancia de los andamios radica en el papel que pueden desempeñar durante el sembrado de células, la proliferación de estas y la consecuente formación de tejido nuevo [42]. Mediante el uso de las técnicas descritas es posible obtener andamios cuya arquitectura permita la interacción de moléculas de señalización de la matriz extracelular, asegurando la adhesión de células y la proliferación y diferenciación de ellas. Diversas investigaciones reportan que esta técnica de obtención de fibras se ha utilizado para replicar la matriz extracelular de piel, hueso, músculo, cartílago, tendón, intestino delgado y vasos sanguíneos (Figura 8) [43].

La elección del material adecuado depende de las propiedades físicas y químicas del polímero y del objetivo de aplicación. Algunos de los más extensamente utilizados son colágeno, quitosano, gelatina, alginatos, PCL, entre otros [42].

### Agradecimientos

Queremos agradecer a la DGAPA UNAM, por el financiamiento otorgado a través del Proyecto PAPIIT IT200424.

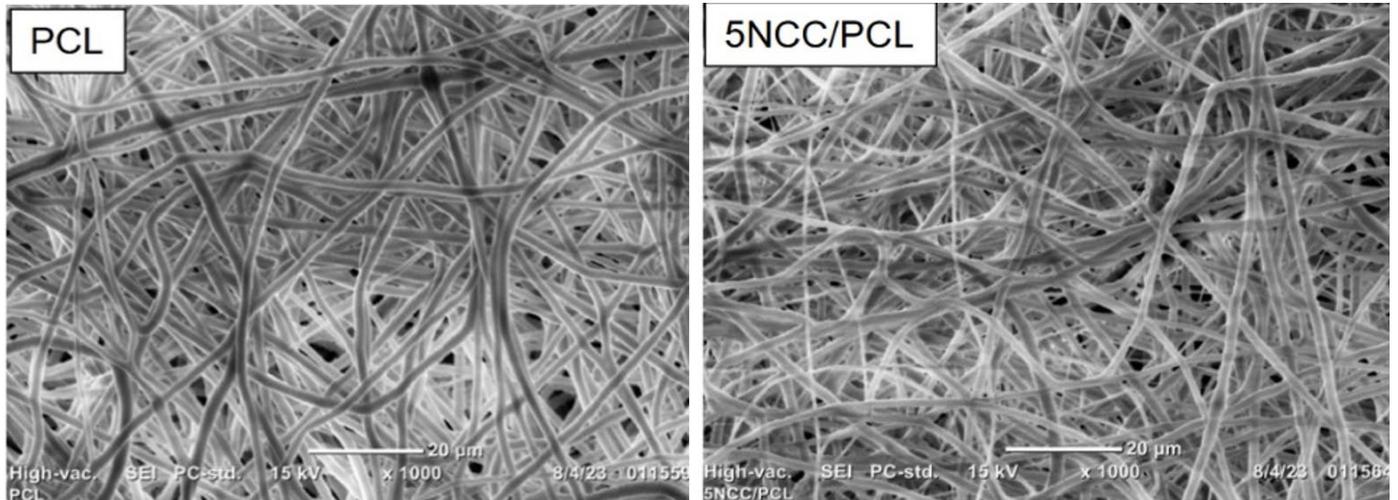


Figura 8. Microfibras obtenidas por electrohilado, de PCL y PCL-nanocelulosa.

## Referencias

- [1] Iqbal, S. et al. Biomaterials evolution: from inert to instructive. *Biomater. Sci.* 11, 6109–6115 (2023).
- [2] Chang Chien, G. C. & Stogicza, A. Regenerative Medicine. in *Pain Care Essentials and Innovations* 245–253 (Elsevier, 2021). doi:10.1016/B978-0-323-72216-2.00017-X.
- [3] Caddeo, S., Boffito, M. & Sartori, S. Tissue Engineering Approaches in the Design of Healthy and Pathological In Vitro Tissue Models. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 5, (2017).
- [4] Poel, W. E. Preparation of Acellular Homogenates From Muscle Samples. *Science* (80-. ). 108, 390–391 (1948).
- [5] Crapo, P. M., Gilbert, T. W. & Badylak, S. F. An overview of tissue and whole organ decellularization processes. *Biomaterials* 32, 3233–3243 (2011).
- [6] Martins, A. R., Matias, G. S. S., Batista, V. F., Miglino, M. A. & Fratini, P. Wistar rat dermis recellularization. *Res. Vet. Sci.* 131, 222–231 (2020).
- [7] Crusio, W. E., Dong, H. & Radeke, H. H. Decellularization: Methods of Tissue and Whole Organ in Tissue Engineering. *Advances in Experimental Medicine and Biology* (2021).
- [8] Ott, H. & Taylor, D. Descelularización y recelularización de órganos y tejidos. 1–21 (2008).
- [9] Guyette, J. P. et al. Perfusion decellularization of whole organs. *Nat. Protoc.* 9, 1451–1468 (2014).
- [10] Duisit, J., Maistriaux, L., Bertheuil, N. & Lellouch, A. G. Engineering Vascularized Composite Tissues by Perfusion Decellularization/Recellularization: Review. *Curr. Transplant. Reports* 8, 44–56 (2021).
- [11] Heath, D. E. A Review of Decellularized Extracellular Matrix Biomaterials for Regenerative Engineering Applications. *Regen. Eng. Transl. Med.* 5, 155–166 (2019).
- [12] Morrissey, J., Mesquita, F. C. P., Hochman-Mendez, C. & Taylor, D. A. Whole Heart Engineering: Advances and Challenges. *Cells Tissues Organs* 1–11 (2021) doi:10.1159/000511382.
- [13] Hussein, K., Korossis, S. & Iop, L. Editorial: Tissue and organ decellularization strategies in regenerative medicine; recent advances, current translational challenges, and future directions. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 11, 1–4 (2023).
- [14] Kemp, P. History of regenerative medicine: looking backwards to move forwards. *Regen. Med.* 1, 653–669 (2006).
- [15] Wang, B. et al. Functional acellular matrix for tissue repair. *Mater. Today Bio* 18, (2023).
- [16] Gilpin, A. & Yang, Y. Decellularization Strategies for Regenerative Medicine: From Processing Techniques to Applications. *Biomed Res. Int.* (2017) doi:10.1155/2017/9831534.
- [17] Orlando, G. et al. Regenerative medicine and organ transplantation: Past, present, and future. *Transplantation* 91, 1310–1317 (2011).
- [18] Sengupta, D., Waldman, S. D. & Li, S. From in vitro to in situ tissue engineering. *Ann. Biomed. Eng.* 42, 1537–1545 (2014).
- [19] Barthes, J. et al. Cell Microenvironment Engineering and Monitoring for Tissue Engineering and Regenerative Medicine: The Recent Advances. *Biomed Res. Int.* 2014, (2014).
- [20] Badylak, S. F., Taylor, D. & Uygun, K. Whole-organ tissue engineering: Decellularization and recellularization of three-dimensional matrix scaffolds. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 13, 27–53 (2011).
- [21] Wan, M. et al. Biomaterials from the sea: Future building blocks for biomedical applications. *Bioact. Mater.* 6, 4255–4285 (2021).
- [22] Vo, T.-S. & Kim, S.-K. Potential Anti-HIV Agents from Marine Resources: An Overview. *Mar. Drugs* 8, 2871–2892 (2010).
- [23] Wang, Y. et al. Marine biomaterials in biomedical nano/micro-systems. *J. Nanobiotechnology* 21, 408 (2023).
- [24] Balagangadharan, K., Rao, H., Shadamarshan, P., Balaji, H. & Selvamurugan, N. Composites Containing Marine Biomaterials for Bone Tissue Repair. in 357–382 (2019). doi:10.1007/978-981-13-8855-2\_16.
- [25] Meyhami, T., Hassanajili, S., Tanideh, N. & Taheri, E. Three dimensional scaffolds of hybrid PLA/PCL/HA/silica nanocomposites for bone tissue engineering. *Polym. Bull.* 81, 6025–6053 (2024).
- [26] Reddy, P. N., Kolla, H. B., Berde, C. V., Kota, R. K. & Veera Bramhachari, P. Biomedical Applications of Marine Biopolymers in Tissue Engineering and Regenerative Medicine. in *Marine Bioactive Molecules for Biomedical and Pharmacotherapeutic Applications* 39–59 (Springer Nature Singapore, 2023). doi:10.1007/978-981-99-6770-4\_3.

- [27] Renita, A. A. et al. Energy recovery and clean water remediation using antibiofouling polysaccharide coated PAN hollow fiber membrane obtained via green route synthesis. *Energy* 294, 130635 (2024).
- [28] Prokopiuk, V. et al. Marine Polysaccharides Carrageenans Enhance Eryptosis and Alter Lipid Order of Cell Membranes in Erythrocytes. *Cell Biochem. Biophys.* (2024) [doi:10.1007/s12013-024-01225-9](https://doi.org/10.1007/s12013-024-01225-9).
- [29] Walma, D. A. C. & Yamada, K. M. The extracellular matrix in development. *Development* 147, (2020).
- [30] Kyle, S., Jessop, Z. M., Al-Sabah, A. & Whitaker, I. S. 'Printability' of Candidate Biomaterials for Extrusion Based 3D Printing: State-of-the-Art'. *Adv. Healthc. Mater.* 6, (2017).
- [31] Naghieh, S., Sarker, M., Sharma, N. K., Barhoumi, Z. & Chen, X. Printability of 3D Printed Hydrogel Scaffolds: Influence of Hydrogel Composition and Printing Parameters. *Appl. Sci.* 10, 292 (2019).
- [32] Corker, A., Ng, H. C.-H., Poole, R. J. & García-Tuñón, E. 3D printing with 2D colloids: designing rheology protocols to predict 'printability' of soft-materials. *Soft Matter* 15, 1444–1456 (2019).
- [33] Electrospun Nanofibers. (Springer International Publishing, 2022). [doi:10.1007/978-3-030-99958-2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-99958-2).
- [34] Wang, X., Ding, B., Sun, G., Wang, M. & Yu, J. Electro-spinning/netting: A strategy for the fabrication of three-dimensional polymer nano-fiber/nets. *Prog. Mater. Sci.* 58, 1173–1243 (2013).
- [35] Blachowicz, T. & Ehrmann, A. Production and Application of Biodegradable Nanofibers Using Electrospinning Techniques. in 1–24 (2021). [doi:10.1007/978-3-030-79979-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-79979-3_1).
- [36] Ashok, N., Sowmya, S. & Jayakumar, R. Fabrication of Multiscale Polymeric Fibres for Biomedical Applications. in 23–36 (2022). [doi:10.1007/12\\_2022\\_137](https://doi.org/10.1007/12_2022_137).
- [37] McKean, R. J. & Heister, E. Mimetix® electrospun scaffold. in *Technology Platforms for 3D Cell Culture* 284–302 (Wiley, 2017). [doi:10.1002/9781118851647.ch12](https://doi.org/10.1002/9781118851647.ch12).
- [38] Vasconcelos, F., Reis, R. L., Martins, A. & Neves, N. M. Biomedical Applications of Fibers Produced by Electrospinning, Microfluidic Spinning and Combinations of Both. in *Electrospun Nanofibers* 251–295 (Springer International Publishing, 2022). [doi:10.1007/978-3-030-99958-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-99958-2_10).
- [39] Ramírez-Marín, Y. et al. Perfusion Decellularization of Extrahepatic Bile Duct Allows Tissue-Engineered Scaffold Generation by Preserving Matrix Architecture and Cytocompatibility. *Materials (Basel)*. 14, 3099 (2021).
- [40] Giraldo-Gomez, D. M. et al. Trypsin as enhancement in cyclical tracheal decellularization: Morphological and biophysical characterization. *Mater. Sci. Eng. C* 59, 930–937 (2016).
- [41] Shoulders, M. D. & Raines, R. T. Collagen Structure and Stability. *Annu. Rev. Biochem.* 78, 929–958 (2009).
- [42] Mwiiri, F. K. & Daniels, R. Electrospun nanofibers for biomedical applications. in *Delivery of Drugs* 53–74 (Elsevier, 2020). [doi:10.1016/B978-0-12-817776-1.00003-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817776-1.00003-1).
- [43] Jun, I., Han, H.-S., Edwards, J. & Jeon, H. Electrospun Fibrous Scaffolds for Tissue Engineering: Viewpoints on Architecture and Fabrication. *Int. J. Mol. Sci.* 19, 745 (2018).

# ¿Cómo se comporta mecánicamente una mermelada de nopal?

**Jorge Octavio Virues Delgadillo**

Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Veracruzana. Circuito Aguirre Beltrán S/N, Zona Universitaria, Xalapa, Veracruz, 91000, México  
[jorgevirues@gmail.com](mailto:jorgevirues@gmail.com)

## Resumen

El efecto de la concentración de azúcar en las propiedades mecánicas (viscosidad, esfuerzo cortante, velocidad de corte) de diferentes muestras de mermelada de nopal *Opuntia ficus-indica* ocasiona un aumento no proporcional en la viscosidad. Este comportamiento puede analizarse utilizando un viscosímetro tipo Brookfield, donde pueden probarse distintos agitadores y velocidades de corte disponibles en la mayoría de los instrumentos existentes para medir la viscosidad de un material. Dentro de los principales resultados que se pueden obtener se encuentra la clasificación del tipo de fluido, donde se encontró que la mermelada de nopal se comporta como un fluido pseudoplástico. Además, se encontró que la mermelada incrementa su viscosidad aparente de valores cercanos a los 4 Pa . s (muestra con 0 % de azúcar añadida) hasta valores cercanos a los 16 Pa . s (muestra con 50 % de azúcar añadida). La mermelada de nopal es una buena fuente de fibra que ayuda a controlar los niveles de colesterol y glucosa en sangre, además de provocar una sensación de saciedad y mejorar la digestión.

## Palabras clave:

Viscosidad, esfuerzo cortante, velocidad de corte, mermelada nopal, temperatura, concentración azúcar.

## Introducción

Los nopales son originarios de América subtropical y tropical, y hoy en día se encuentran en una gran variedad de condiciones agroclimáticas (en forma silvestre o cultivada) en todo el continente americano. Varias de las civilizaciones prehispánicas, como los aztecas, cultivaban y consumían esta hortaliza [1]. En la actualidad es utilizado como ingrediente principal o complemento en una gran variedad de platillos de la gastronomía mexicana. Los nopales se dividen en dos géneros: *Opuntia* y *Nopalea*. En nuestro país existen 104 especies de *Opuntia* y 10 de *Nopalea*, sin embargo, solo se utilizan 15 para forraje, cinco como fruto y cuatro como verdura (tres de *Opuntia* y una de *Nopalea*) [2]. Los principales productores de nopal en México son los estados de Morelos, Ciudad de México y Estado de México. Juntos producen más del 88 % del nopal cosechado en el país [3]. *Opuntia ficus-indica* se usa para producir nopalito (hortaliza) en 10 500 ha [4].

De acuerdo con Rodríguez-Félix y Cantwell, por cada 100 g de nopal, estos contienen alrededor de 91.7 g de agua, 1.1 g de proteínas, 0.2 g de lípidos, 4.6 g de carbohidratos complejos, 0.82 g de azúcares simples, 1.1 g de fibra, 1.3 g de cenizas, 12.7 mg de ácido ascórbico, 0.46 mg de clorofila, 28.9  $\mu\text{g}$  de carotenoides [5, 6]. El mucílago es un polisacárido celulósico fibroso que se encuentra en los cladodios del nopal, contiene aproximadamente 35-40 % de arabinosa, 20-25 % de galactosa, 20-25 % de xilosa, 7-8 % de ramnosa y 7-8 % de ácido galacturónico [7]. Es por esto que se pueden obtener una gran diversidad de compuestos químicos, tal como vitaminas, azúcares, pectinas y colorantes que pueden ser utilizados para elaborar una gran diversidad de subproductos, como jugos, néctares, vinos, licores, miel tipo maple, alcohol industrial, vinagres, aromatizantes, aceites para el consumo humano, pasta, harina forrajera, entre otros [8, 9, 10, 11, 12]. Además del valor nutritivo y composición química, el alto valor del pH (entre 5.3 y 7.1) de la gran mayoría de las especies de nopal, con excepción de *Opuntia xoconostle* (ph menor a 3.5) [13], ocasiona que sea un alimento perecedero donde crecen con facilidad los microorganismos. Para disminuir el crecimiento de los microorganismos en los nopales, estos deben someterse a algún tipo de tratamiento de conservación para alargar su vida de anaquel, donde se reduce el pH acidificando el medio y reduciendo además la actividad de agua [14].

A partir del mucílago de nopal contenido en los cladodios puede obtenerse pectina con grado metoxilo bajo (menor a 13 %) y grado de esterificación entre 82 y 87 %, tal como lo describe Montenegro-Ruales [15]. Uno de los subproductos que se pueden realizar con esta planta son las mermeladas, las cuales son un alimento de consistencia pastosa o gelatinosa, obtenida por cocción y concentración de fru-

tas, adecuadamente preparadas, con adición de edulcorantes [16]. Las mermeladas tienen su principio de conservación en la disminución de la actividad de agua, dificultando el desarrollo de microorganismos. El nopal es considerado un alimento funcional de bajo costo con amplia disponibilidad, ya que contiene fibra dietética que ayuda a controlar los niveles de colesterol y glucosa en la sangre, calcio y mucílago que controla la producción excesiva de ácido gástrico, ayudando al tránsito digestivo y protegiendo la mucosa intestinal, entre otros beneficios.

Los cladodios tienen un alto contenido de fibra, de la cual 30 % es fibra soluble y 70 % fibra insoluble, por lo que es un producto ideal para problemas digestivos. Dentro de sus propiedades funcionales se encuentran un efecto hipoglucemiante que principalmente ayuda a reducir la absorción de azúcares en el intestino (debido a la fibra soluble y a los aminoácidos) y, por ende, la producción de insulina disminuye. Además, se sabe que aminoácidos, fibra y niacina convierten el colesterol de baja densidad (LDL) en colesterol de alta densidad (HDL) previniendo que el exceso de azúcar disuelta en la sangre se convierta en grasa. Por otro lado, las fibras insolubles crean una sensación de saciedad, disminuyendo el hambre y mejorando la digestión mediante la regulación del movimiento intestinal, lo que puede reflejarse a largo plazo en una reducción del peso corporal. Las vitaminas y minerales presentes en el nopal ayudan a eliminar toxinas, fortaleciendo el sistema inmunológico. El ácido benzoico (fenoles) reduce los radicales libres, mejorando la capacidad antioxidante [17]. Debido a lo mencionado anteriormente, una mermelada a base de nopal podría ser un producto que además de brindar aportes nutrimentales, proporcione algún beneficio a la salud del consumidor.

## Metodología

Para poder seleccionar la maquinaria y equipo adecuados para la elaboración de una mermelada a base de nopal y garantizar un estándar de calidad en el producto, una de las variables que deben controlarse es la determinación de la viscosidad del producto terminado, utilizando para ello un viscosímetro tipo Brookfield (modelo 4535, Lab-Line Instruments) y así poder determinar las condiciones óptimas de procesamiento y la formulación correcta del producto. Una de las variables que pueden modificar el comportamiento viscoso de cualquier mermelada es su contenido de azúcar añadido.

En la elaboración de una mermelada de nopal se emplearon nopales *Opuntia ficus-indica* (cladodios), que fueron adquiridos en un mercado local de la ciudad de Xalapa, Veracruz, México, además de azúcar de caña originaria de Mahuixtlán, Veracruz, limones, agua purificada, pectina y bicarbonato de sodio grado alimenticio. El nopal, verdura que se comercializa en el sureste del país, es originario de las nopaleras localizadas en la Ciudad de México [18].

Para la elaboración de la mermelada de nopal, primero se lavan, se pelan y se pican los cladodios (aproximadamente 1 kg de nopales), seguido del escaldado a 90-95 °C durante 5 minutos. Posteriormente, se licuan los nopales hasta obtener una pulpa que debe ser colada previo a la cocción. A continuación, se somete la pulpa a un proceso de cocción a fuego lento hasta reducir su volumen a un tercio del volumen original, momento en el cual se agrega 5 g de ácido cítrico por cada kilogramo de pulpa (el pH de la pulpa obtenida fue de 4.7) junto con la mitad del azúcar a añadir a la mezcla. Una vez que la mezcla resultante se ha homogeneizado, se procedió a agregar la otra mitad de azúcar junto con 0.66 g de pectina por cada 100 g de azúcar añadida y 3 g de bicarbonato

de sodio. Cinco minutos después, se retira del fuego la mermelada y se envasa en recipientes de vidrio previamente esterilizados para proceder a su caracterización mecánica al día siguiente de su elaboración.

Para analizar su comportamiento mecánico se elaboraron seis muestras, cada una con diferente concentración de azúcar añadida (0, 10, 20, 30, 40 y 50 %), manteniendo constantes la concentración de nopal y de los demás ingredientes, y se analizaron con un viscosímetro tipo Brookfield (Figura 1). Los experimentos se realizaron por triplicado, a temperatura ambiente (20 °C), utilizando los agitadores numerados del No. 2 al No. 7 y las siguientes velocidades de corte: 0.05, 0.1, 0.26, 0.52, 1.05, 5.24 y 10.47 s<sup>-1</sup>. En total se llevaron a cabo 864 lecturas de aproximadamente 5 minutos cada una, realizándose 3 repeticiones para las 8 velocidades de corte utilizando los seis agitadores mencionados anteriormente (Figura 2) y las seis concentraciones de azúcar.



Figura 1. Viscosímetro Brookfield (modelo 4535)

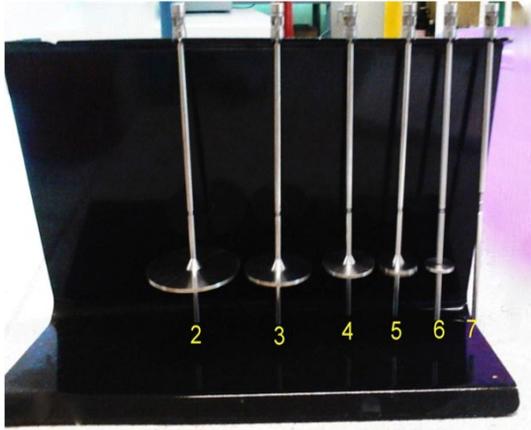


Figura 2. Agitador (diámetro No. 2, 4.7 cm; No. 3, 3.5 cm; No. 4, 2.7 cm; No. 5, 2.1 cm; No. 6, 1.5 cm, y No. 7, 0.2 cm)

Cada agitador empleado en combinación con las diferentes velocidades de corte tiene un rango de valores (de los cuales pueden dar lectura). Estos valores se encuentran expresados en la Tabla 1. Cuando el viscosímetro indica fuera de rango (--), quiere decir que la viscosidad está fuera del alcance máximo del agitador y de la velocidad de corte. Esto hace que el agitador pare para aquellas medidas que están más allá de la capacidad de la pantalla del instrumento. Además, cada una de las geometrías utilizadas tiene un diámetro distinto del disco que conforma el agitador, donde a menor diámetro se pueden medir rangos más

grandes de viscosidades. Se decidió realizar las pruebas a las muestras con distinta concentración de azúcar añadida (utilizando todos los agitadores) pues no se encontró previamente este tipo de análisis con mermelada de nopal en la literatura consultada.

### Resultados y discusión

Para observar el efecto de la adición de azúcar en la viscosidad de mermelada de nopal, se graficó la viscosidad de las diferentes concentraciones de azúcar con respecto al tiempo, utilizando el mismo agitador y velocidad de corte en cada prueba experimental. En la Figura 3 se puede observar el comportamiento dinámico de la viscosidad de la mermelada en sus diferentes concentraciones, a una velocidad de corte de 0.52 rad/s y utilizando el agitador número tres. Tal como se esperaba, se encontró que las viscosidades más grandes corresponden a las muestras de mermelada de nopal con un 50 % de azúcar, seguidas por las viscosidades de las muestras a las otras concentraciones de azúcar añadida. Dicho incremento en la viscosidad pudiera estar influenciado por el efecto gelificante y espesante de la cantidad de mucílago presente en el nopal de forma natural, potenciado por el

Tabla 1. Intervalos estándares de viscosidad para cada agitador y velocidad de corte del viscosímetro Brookfield.

Velocidad (RPM)	Velocidad (rad/s)	Número Agitador					
		2	3	4	5	6	7
		Diámetro Agitador (cm)					
		4.7	3.5	2.7	2.1	1.5	0.2
Viscosidad (cP)							
100	10.47	400	1k	2k	4k	10k	40k
50	5.24	800	2k	4k	8k	20k	80k
20	2.09	2k	5k	10k	20k	50k	200k
10	1.05	4k	10k	20k	40k	100k	400k
5	0.52	8k	20k	40k	80k	200k	800k
2.5	0.26	10k	40k	80k	100k	400k	1000k
1	0.1	10k	100k	100k	100k	1000k	1000k
0.5	0.05	10k	100k	100k	100k	1000k	1000k
Incremento de		1 cP	10 cP			100 cP	

(K= 1,000) Fuente: LAB-LINE (1991)

efecto de la pectina de alto metoxilo añadida a la mermelada durante su elaboración, así como a la concentración de azúcar añadida a la misma. Se demostró, además, que se alcanzó el estado estacionario después de 240 segundos de prueba (Figura 4), ya que la variación de la viscosidad entre el tiempo de 240 y 300

segundos es mínima. Se observó también que un aumento en la velocidad de corte disminuye la viscosidad de la mermelada, por lo que muy probablemente la mermelada de nopal tenga un comportamiento semejante a un fluido pseudoplástico independiente del tiempo o fluido adelgazante.

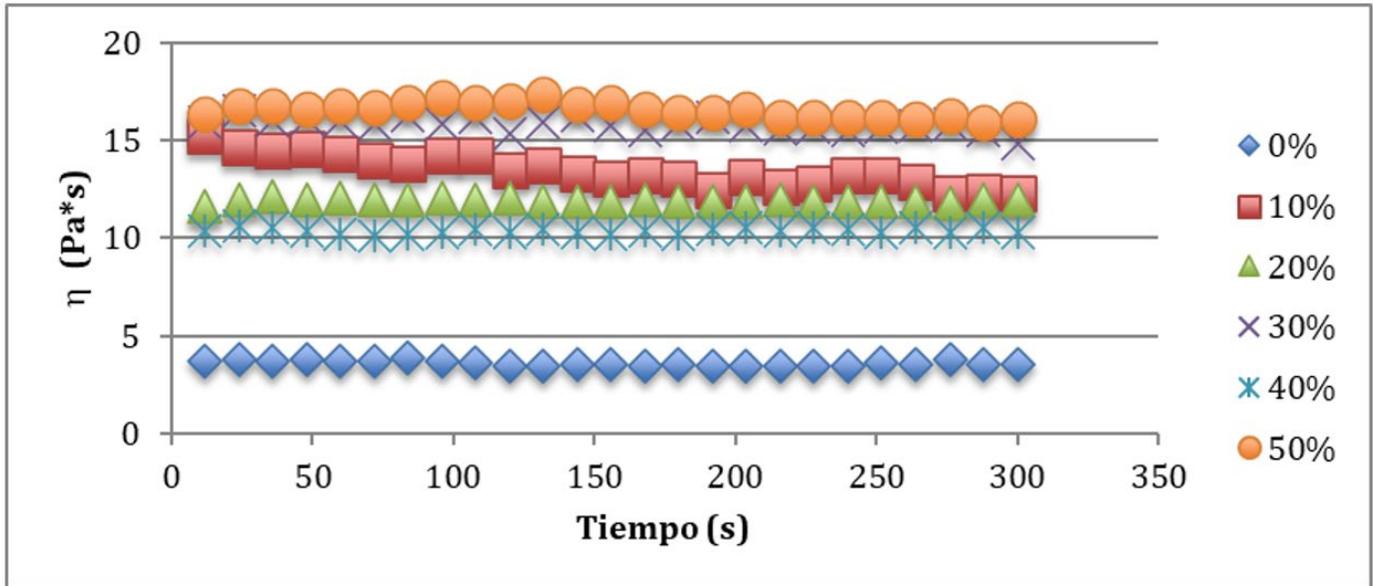


Figura 3. Comportamiento dinámico de la viscosidad para las diferentes concentraciones de azúcar utilizando el agitador No. 3 y una velocidad de corte de 0.52 rad/s

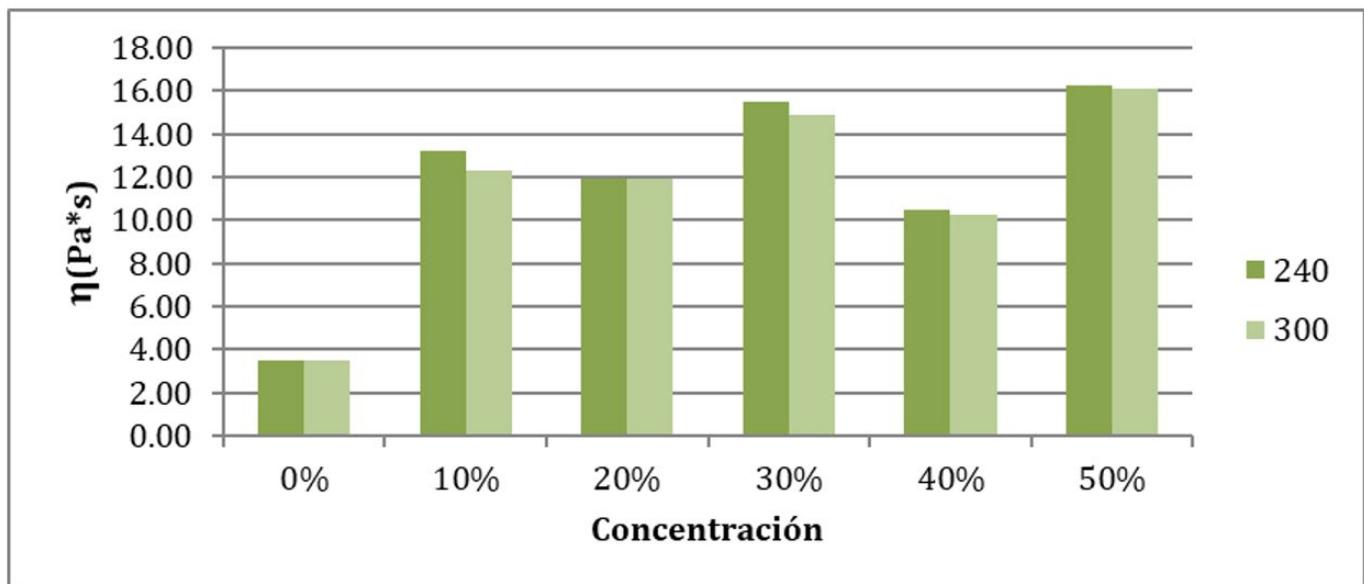


Figura 4. Estado estacionario de la viscosidad, que se logra en los tiempos de 240 y 300 s, para las diferentes concentraciones de azúcar

El efecto de la velocidad de corte en la mermelada de nopal para algunas de las muestras analizadas se observa en las Figuras 5 y 6. Las viscosidades y tiempos se reportan en escala logarítmica para visualizar fácilmente que la viscosidad no cambia ante un incremento del tiempo de prueba, formándose una línea recta horizontal. La viscosidad solo cambia al incrementar la velocidad de corte para un mismo tiempo de prueba. En la Figura 5 se puede apreciar una disminución de la viscosidad al incrementarse la velocidad de corte desde 0.1 hasta 10.47 s<sup>-1</sup>. Este comportamiento reológico puede pertenecer a un fluido pseudoplástico o a uno tixotrópico, sin embargo, lo más probable es que corresponda a un comportamiento pseudoplástico (debido a la mínima variación de la viscosidad en función del tiempo). En otras investigaciones se ha reportado un comportamiento pseudoplástico en muestras comerciales de diversas mermeladas de frutas [19, 20, 21]. Los datos reportados en esta figura corresponden a los promedios de las muestras analizadas con el agitador No. 3 y una concentración de azúcar adicionada del 0 %.

En la Figura 6 se graficaron los datos correspondientes a los promedios de las muestras analizadas con el agitador No. 4 y una concen-

tración de azúcar del 30 %. Se puede apreciar un comportamiento similar entre los datos reportados en la Figura 5 y aquellos de la Figura 6. El efecto de la velocidad de corte sobre la viscosidad es similar para todas las muestras analizadas, independientemente del agitador y concentración utilizados.

Por otro lado, en la Figura 7 se muestran los promedios de las viscosidades aparentes obtenidas, en Pa . s, para las mermeladas de nopal formuladas con las distintas concentraciones de azúcar añadidas. En general, se puede observar el aumento de la viscosidad aparente al incrementar la concentración de azúcar añadida con respecto a la mermelada que no contiene azúcar añadida en la formulación.

En la Figura 8 se observa el efecto de la velocidad de agitación sobre la viscosidad aparente de la muestra con una formulación de 50 % de azúcar añadida. Es evidente que un aumento en la velocidad de corte disminuye considerablemente la viscosidad de la mermelada de nopal analizada. Dicha disminución es no lineal y se asemeja al comportamiento de un fluido pseudoplástico, tal como se comentó previamente.

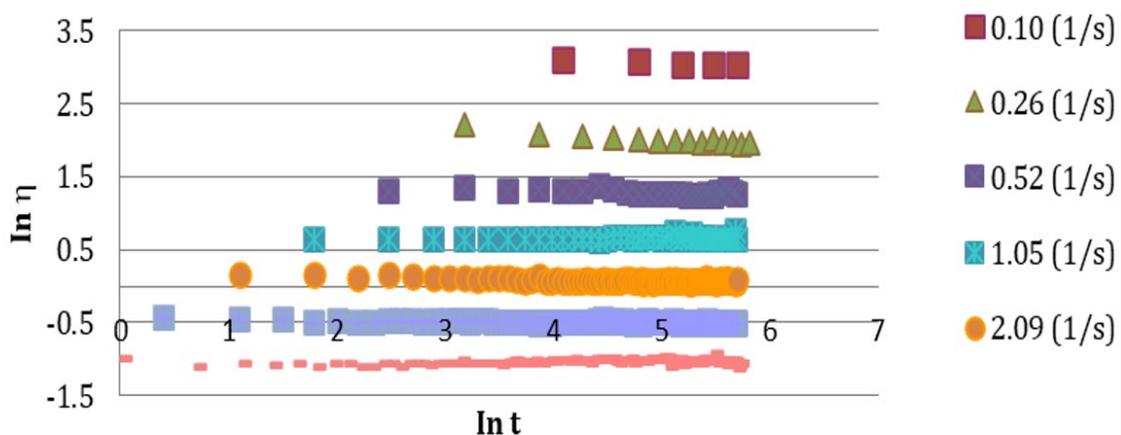


Figura 5. Efecto de las diferentes velocidades de corte sobre el  $\ln(\eta)$  de la mermelada de nopal, con respecto al  $\ln(t)$ , empleando el agitador No. 3 y una concentración del 0%

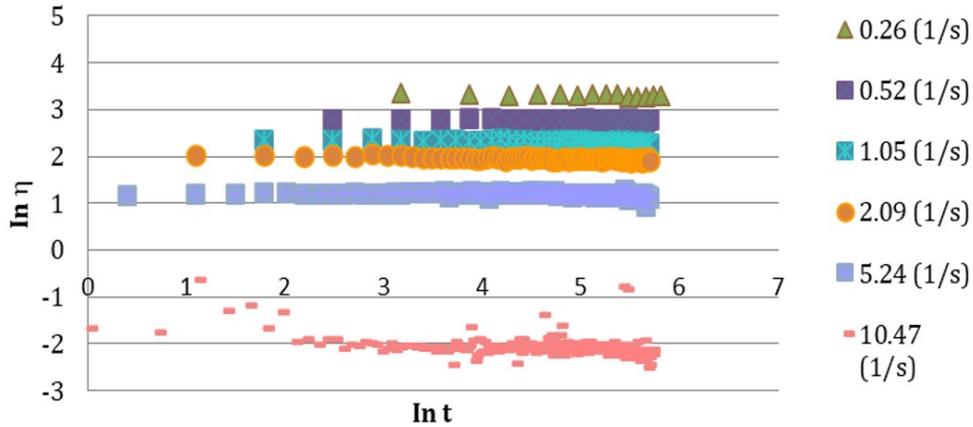


Figura 6. Efecto de las diferentes velocidades de corte sobre el  $\ln(\eta)$  de la mermelada de nopal, con respecto al  $\ln(t)$ , para el agitador No. 4 y una concentración del 30%

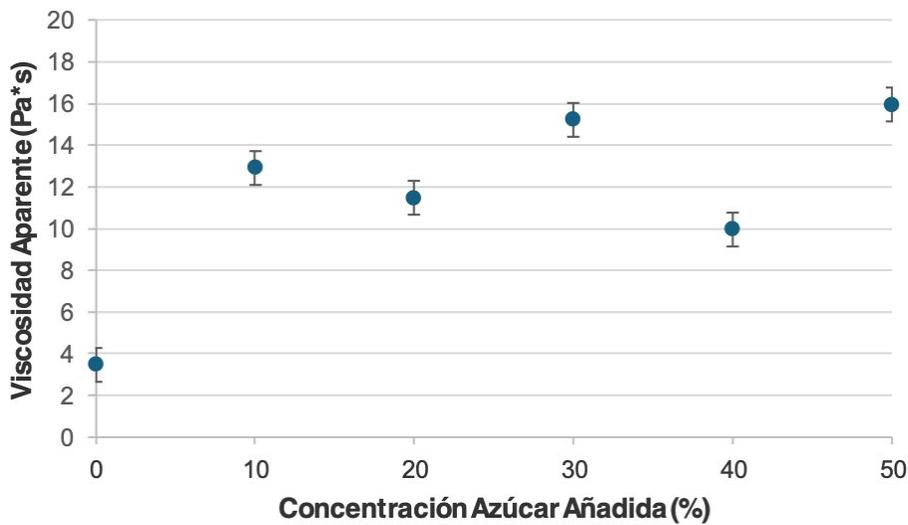


Figura 7. Efecto de la concentración de azúcar añadida sobre la viscosidad aparente (Pa . s) de la mermelada de nopal para el agitador No. 3 y una velocidad de corte de 0.52 rad/s

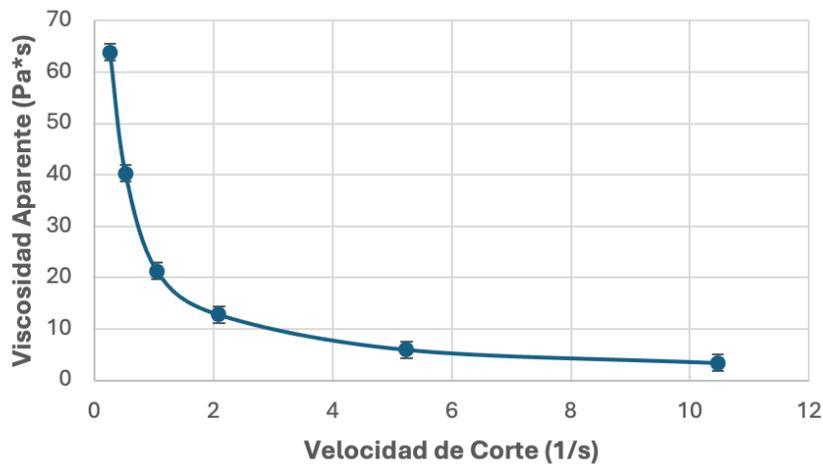


Figura 8. Efecto de la velocidad de corte sobre la viscosidad aparente (Pa . s) de la mermelada de nopal, para el agitador No. 5 y una concentración de azúcar añadida de 50%

## Conclusiones

En este trabajo se prepararon mermeladas de nopal con distintas concentraciones de azúcar (0, 10, 20, 30, 40 y 50 %) y se realizaron pruebas experimentales con el propósito de obtener la viscosidad aparente de cada una de ellas en un intervalo de cinco minutos, a diferentes velocidades de corte, para así elucidar el efecto de la concentración de azúcar sobre la viscosidad de las muestras de mermelada de nopal. La mermelada de nopal tiene una consistencia adecuada debido a la cantidad de mucílago presente de manera natural y a la cantidad de pectina agregada a la formulación. Se observó un aumento no proporcional de viscosidad de la mermelada de nopal con respecto a la concentración de azúcar, esto pudo deberse a que, aunque se intentó que las condiciones de los nopales fueran similares para la elaboración de cada muestra, era muy difícil que todos se encontraran en el mismo punto de maduración, cambiando así la composición química entre unos nopales y otros. La disminución de la viscosidad con respecto al aumento de la velocidad de corte puede deberse a que hay un reacomodo de las partículas. Antes de que se inicie el movimiento, estas partículas se encuentran en desorden (conforme se da el movimiento se van ordenando, tomando una misma dirección y facilitando el flujo del fluido). También puede ser que esté conformado por filamentos que se encuentran enredados y a medida que aumenta la velocidad de corte, estos se desenreden en la dirección del flujo.

Finalmente, se encontró que la mermelada de nopal incrementa su viscosidad aparente de valores cercanos a los 4 Pa . s (en la muestra con 0 % de azúcar añadida) hasta valores cercanos a los 16 Pa . s (en la muestra con 50 % de azúcar añadida). Dentro de las líneas

de investigación que se tienen en el cuerpo académico UV-CA-475 "Ciencia, Ingeniería y Tecnología de Alimentos" se encuentra lo relacionado con la caracterización fisicoquímica, sensorial y reológica de los alimentos.

## Agradecimientos

Parte del estudio realizado en esta investigación fue posible gracias a la asistencia de la ingeniera química Daniela Hernández Jorge, que en paz descansa.

## Referencias

- [1] Reyes-Agüero, J. A., Aguirre-Rivera, J. R.; Hernández, H. M. (2005). "Systematic notes and a detailed description of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae)". *Agrociencia*, 39(4), 395-408.
- [2] Bravo H., H. (1978). "Las cactáceas de México". Vol. 1, 743. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- [3] Gaona, E. G., Argente-Martínez, L., Aguilar, L. P., Peñuelas-Rubio, O., Munguía, A. M. G., & Ramos, K. V. D. L. (2024). *El Nopal: ecofisiología del nopal en México*. Pantanal Editora. <https://doi.org/10.46420/9786585756211>
- [4] Valdez-Cepeda, R. D.; Blanco-Macias, F.; Vázquez-Alvarado, R. E.; Magallanes-Quintanar, R. (2007). "Producción y usos del nopal para verdura", *Revista Salud Pública y Nutrición*, VI Simposium Taller Producción y Aprovechamiento del Nopal en el Noreste de México, 7-8 de diciembre de 2007, Mariny, NL, México. Edición Especial No. 14 2008.
- [5] Rodríguez-Felix, A.; Cantwell, M. (1988). "Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (nopalitos)". *Plant foods for Human nutrition*, 38, 83-93.
- [6] Maki-Díaz, G.; Peña-Valdivia, C. B.; García-Nava, R.; Arévalo-Galarza, M. L.; Calderón-Zavala, G.; Anaya-Rosales, S. (2015). "Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional". *Agrociencia*, 49(1), 31-51.
- [7] Vargas-Solano, S. V.; Rodríguez-González, F.; Martínez-Velarde, R.; Campos-Mendiola, R.; Hurtado-Salgado, M. A.; Muthuswamy-Ponniah, J. (2022). "Chemical composition of nopal mucilage at different maturity stages". *Agrociencia*. 56(2), 1-12. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2726>.
- [8] Guzmán, D.; Chávez, J. (2007). "Estudio Bromatológico del Cladodio del Nopal (*Opuntia ficus-indica*) para el Consumo Humano". *Revista de la Sociedad Química del Perú*, Vol. 73, 2007.
- [9] Sáenz, C.; Berger, H.; Corrales-García, J.; Galletti, L.; García de Cortázar, V.; Higuera, I. (2006). *Utilización Agroindustrial del Nopal Roma: Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y la Alimentación*.
- [10] Torres-Sales, A. (2011). "Composición Química de Nopal y sus Implicaciones en la Nutrición de Rumiantes". *Revista Salud Pública y Nutrición (RESPYN)* Vol. 5.
- [11] Valdez, R.; Blanco, F.; Vázquez, R.; Magallanes, R. (2008). "Producción y Usos del Nopal Para Verdura". *Revista Salud Pública y Nutrición*, Vol. 14.

- [12] Ponce-Luna, A., Pérez-Flores, J. G., Pérez-Escalante, E., Portillo-Torres, L. A., García-Curiel, L., & Contreras-López, E. (2024a). Potencial del nopal para su incursión en la industria de la confitería. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 11(22), 28–33. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11i22.11074>
- [13] Mayorga, M. C.; Urbiola, M. C.; Suárez, R., Escamilla, S. H. M. (1990). "Estudio agronómico de xoconostle *Opuntia* spp. en la zona semiárida del estado de Querétaro". En: López, J. J.; Ayala, M. J. S. Eds., 239 - 245. Memoria 3ra reunión nacional 1ra reunión internacional sobre conocimiento y aprovechamiento del nopal. Ed. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", Saltillo, Coahuila, México.
- [14] Sáenz, C.; Berger, H. (2006). "Utilización agroindustrial del nopal". *Food & Agriculture Org*. Vol. 162.
- [15] Montenegro-Ruales, E. G. (2015). "Obtención de pectina de Nopal (*Opuntia* spp), a diferentes tiempos y temperaturas, utilizando ácido sulfúrico". Bachelor's thesis.
- [16] Coronado, M.; Rosales, R. (2001). "Elaboración de Mermeladas: Procesamiento de Alimentos Para Pequeñas y Micro Empresas Agroindustriales". Centro de Investigación, Educación y Desarrollo, Lima, Perú.
- [17] Anrrango-Sola, A. F.; Burbano-Pozo, A. M. (2012). "Elaboración de Mermelada Dietética apta para Personas Diabéticas Utilizando Mezcla de Penca de Nopal (*Opuntia ficus indica*) y Fresa (*Fragaria vesca* L.)". Doctoral Dissertation, Universidad Técnica Del Norte.
- [18] Cruz, E. I. R.; Miranda, H. C. (2022). "Nopal/tuna, mercado y territorio en México: un enfoque de capacidades". *Eutopía: Revista de Desarrollo Económico Territorial*, (21), 100-123.
- [19] Basu, S.; Shivare, U. S. (2012). "Rheological, Textural, Microstructural and Sensory Properties of Sorbitol-Substituted Mango Jam". *Food Bioprocess Technoly Journal*, Ed. Springer.
- [20] Villarán, M.; Cepeda, E.; Llorens, F.; Ibarz, A. (1997). "Estudio de la Influencia de la Temperatura en el Comportamiento Reológico de Mermeladas de Albaricoque (*Prunus armeniaca*), arándano (*Vaccinium myrtillus*) y escaramujo (*Rosa canina*)". *Food Science and Technology International*, 13-19.
- [21] Gao, X.; Yu, T.; Zhang, Z.; Xu, J; Fu, X. (2011). "Rheological and Sensory Properties of Four Kinds of Jams". *Journal of Stored Products and Postharvest Research*, Vol. 2, 227-234.
- [22] LAB-LINE. (1991). Operation Manual: LAB-LINE Viscometers. Illinois.

# Material de apoyo a la docencia: Noche de las estrellas 2024: carpa diversa en Morelia y Ciudad Universitaria

**Citlali Correa Pérez, Astron Rigel Martínez Rosas**

Servicio Social. Escuela Nacional Preparatoria N° 4 "Vidal Castañeda y Najera"  
UNAM. Av. Observatorio 170, Observatorio, Miguel Hidalgo, 11860 Ciudad de  
México, CDMX







Su opinión es importante para nosotros. Puede hacernos llegar comentarios, dudas y aportaciones por medio de las vías institucionales y al correo electrónico: [revista@materiales.unam.mx](mailto:revista@materiales.unam.mx)

Le haremos llegar sus preguntas a los respectivos autores. Si tiene interés en publicar con nosotros, le invitamos a conocer los lineamientos editoriales en nuestra página: <https://revista.iim.unam.mx/>

