

GRAFENO: UNO DE LOS MATERIALES MÁS VERSÁTILES EN LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

GRAPHENE: ONE OF THE MOST VERSATILE MATERIALS IN SCIENCE AND TECHNOLOGY

Nayeli Colin Becerril*
Ángel Leonardo Martínez López
Julio Gregorio Mendoza Álvarez
José Luis Herrera Pérez
Yenny Lucero Casallas Moreno

Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y
Tecnologías. Programa de Doctorado en Nanociencias y
Nanotecnología. Departamento de Física.
Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y
Tecnologías Avanzadas.
SECIHTI, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería
y Tecnologías Avanzadas.
Instituto Politécnico Nacional, C.P. 07360, Ciudad de
México, México.

Correos:

ncolinc2200@alumno.ipn.mx
angel.martinezlpz@cinvestav.mx
julio.mendoza@cinvestav.mx
jherrerap@ipn.mx
ycasallasm@ipn.mx

<https://orcid.org/0009-0003-4639-8042>
<https://orcid.org/0000-0002-8987-8092>
<https://orcid.org/0000-0002-1325-6465>
<https://orcid.org/0000-0003-3978-3965>
<https://orcid.org/0000-0001-7998-2067> Año 11 No. 32

Resumen

El grafeno, una lámina bidimensional (2D) compuesta por una única capa de átomos de carbono, se ha consolidado como uno de los materiales más prometedores del siglo XXI gracias a sus propiedades excepcionales. Desde su descubrimiento en 2004, ha sentado las bases para el estudio de toda la familia de materiales 2D e inspirado una intensa investigación orientada al desarrollo de aplicaciones científicas y tecnológicas innovadoras. Este artículo describe los principales métodos de síntesis del grafeno, agrupados en enfoques descendentes y ascendentes, resaltando la técnica de deposición química de vapor (CVD) como la opción más prometedora para producirlo a gran escala y de alta calidad. Además, se presentan las propiedades estructurales que explican su comportamiento sorprendente, así como sus numerosas aplicaciones actuales, destacando su potencial en campos como la electrónica, la energía, la medicina, el medio ambiente y las tecnologías de la información y la comunicación. El grafeno no solo ha impulsado la era de los materiales 2D, sino que continúa potenciando el desarrollo de tecnologías más sostenibles, eficientes y limpias.

Palabras clave: grafeno, nanotecnología, nanomaterial bidimensional, síntesis, ciencia.

Abstract

Graphene, a two-dimensional (2D) material composed of a single layer of carbon atoms, has been positioned as one of the most promising materials of the 21st century due to its exceptional properties. Since its discovery in 2004, it has established the foundation for the study of the entire family of 2D materials and inspired intense research aimed at developing innovative scientific and technological applications. This article describes the primary methods of graphene synthesis, categorized into top-down and bottom-up approaches, with a focus on the chemical vapor deposition (CVD) technique as the most promising option for producing graphene on a large scale and with high quality. It also presents the structural properties that explain its remarkable behavior, along with its numerous current applications, emphasizing its potential in fields such as electronics, energy, medicine, the environment, and information and communication technologies. Graphene has not only promoted the era of 2D materials, but also continues to enable the development of more sustainable, efficient, and cleaner technologies.

Keywords: graphene, nanotechnology, two-dimensional nanomaterial, synthesis, science.

Introducción

¿Por qué el grafeno es mucho más que una capa de carbono?

El grafeno es uno de los materiales más sorprendentes y prometedores del siglo XXI, capaz de revolucionar múltiples campos de la ciencia, la medicina y la tecnología. Formado por una sola capa de átomos de carbono, es el material más delgado conocido hasta ahora. Sus propiedades excepcionales han despertado un enorme interés en la comunidad científica, especialmente por su potencial para desarrollar dispositivos portátiles, flexibles y altamente eficientes, capaces de consumir menos energía y ser más económicos y amigables con el medio ambiente.

La historia del grafeno comenzó en 2004, cuando Andre Geim y Konstantin Novoselov, de la Universidad de Mánchester, lograron aislar por primera vez una única capa de átomos de carbono. Lo más sorprendente de su descubrimiento fue que utilizaron una técnica extremadamente sencilla: la exfoliación mecánica, como se aprecia en la Figura 1. Este método consistió en presionar un trozo de grafito sobre una cinta adhesiva para adherir algunas de sus capas, y luego en pegar y despegar la cinta repetidamente, separando progresivamente las capas más gruesas en capas cada vez más delgadas hasta obtener una sola capa de átomos de carbono (Novoselov et al., 2004). Así nació el primer material bidimensional (2D) de la historia.

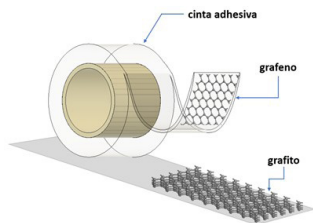


Figura 1. Obtención de grafeno por exfoliación mecánica. (Elaboración propia)

Este descubrimiento representó un avance fundamental en la ciencia de los materiales, y en 2010 Geim y Novoselov fueron galardonados con el Premio Nobel de Física “por sus experimentos pioneros sobre el material bidimensional grafeno” (The Nobel Prize in Physics 2010, n.d.). Desde

entonces, el grafeno ha sido considerado el “padre” de los materiales 2D y ha abierto la puerta al hallazgo de otros materiales, como el disulfuro de molibdeno (MoS₂), que también muestra propiedades excepcionales para su aplicación en dispositivos avanzados (An et al., 2022). Los materiales 2D o bidimensionales son materiales cuya estructura tiene un espesor de apenas uno o unos pocos átomos, lo que les otorga una estructura extremadamente delgada, como una hoja de papel, pero a escala nanométrica que se extiende prácticamente en dos dimensiones (largo y ancho). Esta característica les confiere propiedades únicas, eléctricas, mecánicas, ópticas y químicas, que no se observan en materiales convencionales.

Pero ¿qué hace tan especial al grafeno? La clave está en su estructura: una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una red cristalina hexagonal, similar a un panel de abejas, como se ilustra en la Figura 2. En este patrón, los átomos están fuertemente unidos mediante enlaces covalentes, lo que le otorga una resistencia comparable a la del acero y los convierte en excelentes conductores eléctricos, superando al cobre (Geim & Novoselov, 2007). Además, se destaca por su capacidad de conducir el calor mejor que cualquier otro material conocido.



Figura 2. Esquema ilustrativo de la estructura del grafeno similar a un panel de abejas. (Elaboración propia)

Es fascinante cómo el simple reordenamiento de los átomos de carbono puede dar lugar a materiales con propiedades completamente distintas. Este elemento, tan común en la naturaleza, puede adoptar diferentes formas estructurales conocidas como alótropos, entre las cuales se

encuentran el diamante, el grafito, los nanotubos de carbono, el fullereno y el propio grafeno (Saeed et al., 2020), ver Figura 3. Por ejemplo, mientras el diamante es extremadamente duro y actúa como un excelente aislante, el grafito es sumamente suave, frágil y conduce muy bien la electricidad y el calor.

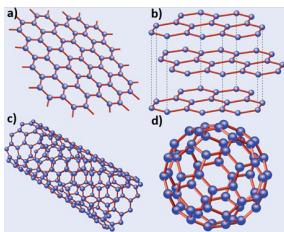


Figura 3. Alótropos de carbono: a) grafeno, b) grafito, c) nanotubos de carbono y d) fullereno. (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-7058/19/11/34>)

Las grandes expectativas en el grafeno y en su integración con otros compuestos para impulsar el desarrollo de futuros dispositivos siguen motivando una intensa investigación de este material. Por esta razón, en este artículo exploraremos las diferentes formas de obtener el grafeno en la actualidad, sus propiedades más fascinantes y cómo este material está transformando el futuro de la tecnología y de nuestra sociedad.

Síntesis de grafeno: Rutas para obtener uno de los materiales más versátiles del siglo XXI

El grafeno fue descubierto de una manera ingeniosa: al despegar una única capa de átomos de carbono del grafito utilizando cinta adhesiva. Aunque este método es sencillo y accesible, no es adecuado para producir grandes cantidades de grafeno, como se requiere en aplicaciones tecnológicas avanzadas. Hoy en día, se han desarrollado múltiples métodos para su producción, los cuales se pueden dividir en dos enfoques: de arriba hacia abajo (ruta descendente) y de abajo hacia arriba (ruta ascendente).

El enfoque descendente consiste en la exfoliación, separación o fragmentación

de material gráfitico en bulto (en volumen) para obtener el grafeno. Este es el método que Geim y Novoselov utilizaron en su descubrimiento. El enfoque ascendente implica la síntesis de material, en la que se forman enlaces entre los átomos de carbono en el plano, construyendo la estructura 2D. Este método permite una producción más controlada y escalable de grafeno de alta calidad (Bhuyan et al., 2016). Los dos enfoques han desarrollado diversas técnicas para la producción de grafeno, como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Enfoque descendente y ascendente para la síntesis de grafeno. (Elaboración propia)

Entre las técnicas de la ruta descendente se incluyen la exfoliación mecánica, la exfoliación química y la síntesis química. La exfoliación mecánica utiliza cinta adhesiva u otras herramientas similares para producir capas de grafeno de alta calidad; sin embargo, esta técnica se limita a estudios de laboratorio, ya que no es adecuada para la producción a gran escala (Bhuyan et al., 2016; Zhang, 2022). Por otro lado, la exfoliación química modifica el grafito para obtener una solución coloidal de grafeno, separando las capas al debilitar las fuerzas de Van der Waals, ya sea por calentamiento o sonicación. Aunque es más adecuada para la producción a gran escala, esta técnica puede generar defectos estructurales e impurezas en el material obtenido (Bhuyan et al., 2016; Parvez et al., 2015).

La reducción de óxido de grafito es uno de los métodos de síntesis química más comunes para obtener grafeno. Consiste en oxidar grafito con ayuda de ácidos fuertes y agentes oxidantes para formar óxido de grafeno (GO), que posteriormente se reduce mediante procesos químicos, tér-

micos o electroquímicos para obtener capas de grafeno (Bhuyan et al., 2016; Zhang, 2022). A pesar de ser un método sencillo y económico que permite producir grandes cantidades de grafeno, la calidad final del material puede verse afectada, ya que resulta difícil obtener grafeno puro y de una sola capa.

Entre las técnicas ascendentes, se incluyen el crecimiento epitaxial, la ablación láser y la deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés). El crecimiento epitaxial se logra calentando carburo de silicio (SiC) a altas temperaturas, lo que provoca la evaporación de los átomos de Si y deja una capa de átomos de C que se reorganizan para formar grafeno en la superficie (Bhuyan et al., 2016; Zhang, 2022). Aunque este método ofrece buena uniformidad y grafeno en monocapa, enfrenta desafíos como la alta temperatura y la dificultad de transferir el grafeno a otros sustratos.

Si bien la elección del método de producción es clave para definir el tipo de aplicación del grafeno, la técnica CVD es la más utilizada y prometedora, ya que permite obtener grafeno de alta calidad y gran área, y además permite escalar su producción para aplicaciones industriales, electrónicas y ópticas. Este proceso consiste en descomponer gases que contienen carbono, como el metano, sobre una superficie metálica (generalmente cobre o níquel), a altas temperaturas entre 700 y 1000 °C, formando una capa de grafeno en el sustrato (Bhuyan et al., 2016; Zhang, 2022). Posteriormente, se realiza un proceso de transferencia para eliminar el metal y depositar el grafeno sobre el sustrato final requerido para las aplicaciones deseadas.

El desafío en la transferencia de grafeno a un sustrato final

La investigación para lograr una transferencia de grafeno libre de defectos ha avanzado significativamente. Hoy en día, se han propuesto varios métodos para garantizar una transferencia efectiva y mantener su integridad estructural. Entre los más comunes se encuentran la transferencia húmeda, que emplea soluciones

químicas y una capa de polímero para proteger el grafeno, y la transferencia en seco, que evita el uso de reactivos líquidos. También se incluyen la delaminación asistida por burbujas y la transferencia directa, en la que se busca sintetizar grafeno directamente sobre el sustrato final, evitando la necesidad de un proceso de transferencia (Ullah et al., 2021). En este contexto, un sustrato es la superficie o el material base sobre el que se deposita el grafeno. Esta combinación del grafeno con el sustrato es la que finalmente se utiliza para crear diversos dispositivos y materiales con propiedades avanzadas.

Cada método tiene sus propias ventajas y limitaciones, pero todos requieren un gran cuidado y un control preciso del proceso. Por ejemplo, como se ilustra en la Figura 5, en la transferencia húmeda basada en polímeros se utiliza una capa polimérica de soporte para proteger el grafeno durante su manipulación. Posteriormente, el sustrato de crecimiento (cobre o níquel) se disuelve químicamente, se realiza un lavado y se transfiere el grafeno al sustrato final. Por último, la capa soporte se disuelve para obtener una superficie limpia y con la menor cantidad de residuos posible (Martínez-López et al., 2024). Este tipo de transferencia se lleva a cabo en el grupo de investigación del Laboratorio de Nanofotónica, el cual forma parte de los programas de posgrado de la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del Instituto Politécnico Nacional (UPIITA-IPN), donde se ha perfeccionado esta técnica para su aplicación en el desarrollo de materiales avanzados.

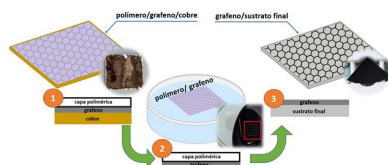


Figura 5. Esquema de la transferencia húmeda (usando soluciones químicas) de grafeno a un sustrato final. (Elaboración propia).

Una mirada a sus propiedades más fascinantes

Las enormes expectativas en el grafeno se deben a sus propiedades sorprendentes. Para entenderlas, primero hay que mirar su estructura: el grafeno forma una red bidimensional, compuesta por una capa de átomos de carbono, como se aprecia en la Figura 6. En esta capa, cada átomo aporta tres de sus cuatro electrones de valencia (electrones que participan en la formación de enlaces) para dar lugar a los conocidos orbitales híbridos sp^2 , es decir, una combinación de orbitales atómicos que permite la formación de enlaces fuertes en un plano. Los electrones en estos orbitales híbridos se orientan hacia los tres átomos vecinos y forman enlaces simples de tipo covalente entre los átomos, llamados enlaces sigma (σ). Precisamente, estos enlaces son los responsables de que el grafeno sea un material con una estructura hexagonal de gran resistencia mecánica (Subramaniam et al., 2023).

El cuarto electrón de valencia de cada átomo ocupa un orbital tipo p , que no se hibrida y se orienta perpendicular al plano de la capa. Al solaparse con los orbitales vecinos, forma los enlaces π (π), ver Figura 6. En conjunto, estos electrones generan una nube electrónica deslocalizada que se extiende por encima y por debajo del plano hexagonal del grafeno. Esta nube permite que los electrones se muevan libremente, lo que explica la alta conductividad eléctrica y otras propiedades electrónicas únicas del grafeno (Geim & Novoselov, 2007). Esa misma nube deslocalizada puede interactuar de manera electroestática con las nubes electrónicas de otros materiales (incluidas otras capas de grafeno), generando atracciones o repulsiones entre las nubes y dando paso a los enlaces de tipo Van der Waals.

Con un espesor de aproximadamente 0.335 nm (equivalente al grosor de un átomo de carbono), el grafeno es el material más delgado conocido hasta este momento. Para ponerlo en perspectiva, se necesitarían apilar unas 300.000 capas de grafeno para igualar el espesor de una hoja de papel. Gracias a este espesor, es un material casi transparente, ya que absorbe solamente el 2.3 % de la radiación incidente (An et al., 2022).

También tiene una alta flexibilidad, lo que abre la puerta a numerosas aplicaciones tecnológicas.

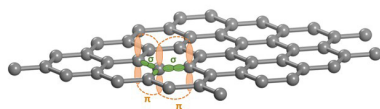


Figura 6. Representación esquemática de cómo se unen los átomos en el grafeno: enlaces σ y π . (Elaboración propia)

La era del grafeno y los materiales 2D

El descubrimiento del grafeno no solo ha transformado la ciencia de los materiales; también ha impulsado significativamente la búsqueda de nuevos materiales 2D. Gracias a este esfuerzo, hoy es posible aislar capas atómicas a partir de materiales en bulto (en volumen). Incluso semiconductores tan estudiados como el silicio y el germanio se han reducido a su forma monoatómica, dando origen a nuevos materiales 2D, como el siliceno y el germaneno, con propiedades completamente distintas a las de su forma en bulto.

Este fenómeno no se limita a elementos puros: también se ha extendido a compuestos y aleaciones semiconductoras, como el GaSe, GaN y los ya populares dicalcogenuros de metales de transición (TMDs), por ejemplo, el MoS_2 y WS_2 , entre otros. Las extraordinarias propiedades de estos materiales han motivado a la comunidad científica a explorar los materiales 2D como una estrategia para modificar radicalmente las propiedades físicas y químicas, revelando comportamientos exóticos ausentes en sus contrapartes en bulto.

Además, como ya se mencionó, los enlaces de Van der Waals presentes en la superficie del grafeno permiten combinar distintos materiales 2D sin necesidad de que sus redes cristalinas coincidan perfectamente. Esto ha propiciado la generación de heteroestructuras apiladas, que son estructuras formadas por capas de diferentes materiales, colocadas una sobre otra, como si se tratara de bloques de Lego a escala atómica. Así se pueden integrar materiales como sili-

ceno, germaneno y grafeno en una sola estructura, como se muestra en la Figura 7. Esta flexibilidad permite diseñar materiales con propiedades ajustables para aplicaciones específicas, combinando las mejores características de cada material.

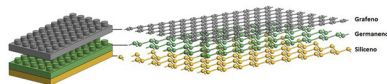


Figura 7. Heteroestructura formada por capas de diferentes materiales 2D. (Elaboración propia)

Avances y oportunidades tecnológicas del grafeno

Desde su descubrimiento, el grafeno ha dejado de ser un simple hallazgo de laboratorio para convertirse en el motor de múltiples avances que prometen transformar la tecnología tal como la conocemos, impulsando el desarrollo de aplicaciones de próxima generación. Si bien su descubrimiento mereció el Premio Nobel de Física en 2010, su impacto en la tecnología y la sociedad apenas comienza a vislumbrarse.

En el mundo de la electrónica, el grafeno ha mostrado un gran potencial en el desarrollo de dispositivos microelectrónicos y optoelectrónicos gracias a su alta movilidad electrónica y su excelente conductividad. Estas características, junto con la posibilidad de ajustar sus propiedades ópticas, lo convierten en un material ideal para el desarrollo de transistores ultrarrápidos, fotodetectores, diodos emisores de luz, láseres, sensores, pantallas flexibles y circuitos impresos avanzados (Bao et al., 2009; Han et al., 2017; Jia et al., 2016; Lu et al., 2009; Sengupta & Hussain, 2022; Xia et al., 2009), como ejemplo ver Figura 8. A diferencia del silicio, el grafeno permite fabricar dispositivos más delgados, flexibles y eficientes, con velocidades de operaciones superiores y con un menor consumo energético. Por estas razones, el grafeno se perfila como un componente clave para futuras aplicaciones en teléfonos móviles, pantallas táctiles y computadoras de alto rendimiento (Research, n.d.; Santos et al., 2025).

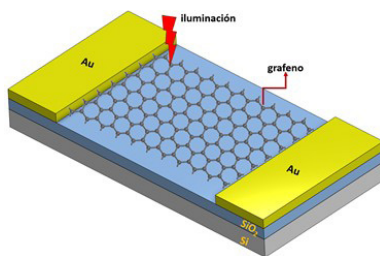


Figura 8. Estructura de un fotodetector de grafeno bajo iluminación, con los contactos en la parte superior. (Elaboración propia)

En la industria energética, el grafeno también ha despertado un gran interés. Este material mejora la capacidad y la velocidad de carga de las baterías (Hou et al., 2011; Xiang et al., 2016), un aspecto esencial para vehículos eléctricos y dispositivos portátiles que requieren baterías de larga duración. Por ejemplo, empresas como Huawei han desarrollado baterías usando grafeno, las cuales son capaces de operar a temperaturas más altas (hasta 60 °C) y con mayor durabilidad que las baterías de iones de litio convencionales. Esta innovación fue anunciada en 2016 por Watt Laboratory, y representa un paso importante hacia dispositivos más resistentes y de mayor vida útil (Huawei Achieves Major Breakthrough in Graphene-Assisted High Temperature Li-Ion Batteries - Huawei Press Center, n.d.). Además, en productos como el Huawei Mate 20 X, la empresa empleó una lámina de grafeno para ayudar a disipar el calor, lo que mantiene el dispositivo más fresco durante el uso intensivo (Huawei Community, n.d.).

En el campo de los materiales compuestos y recubrimientos, el grafeno se utiliza como aditivo para la fabricación de productos más ligeros, resistentes, duraderos, anticorrosivos y antimicrobianos. Esto mejora el rendimiento y la eficiencia de los materiales sin comprometer su durabilidad, impulsando su aplicación en sectores como la industria automotriz, aeroespacial, de concreto, plástico y pinturas (Aditivo para concreto - Graphenemex, 2023; Awate et al., 2023; Graphenemex, 2022, 2024b).

En medicina, el grafeno ha despertado gran interés por su compatibilidad con el cuerpo humano. Actualmente, se explora su uso en distintas aplicaciones, como la liberación controlada de medicamentos, el transporte eficiente de fármacos, la detección de biomarcadores y el desarrollo de biosensores para el diagnóstico de enfermedades (Priyadarsini et al., 2018). Estas aplicaciones brindan la oportunidad de desarrollar tratamientos más precisos, terapias personalizadas y tecnologías de diagnóstico más sensibles y tempranas (Mohamed Noor et al., 2025).

Además, en tecnologías de membranas para la purificación de agua, el grafeno ha mostrado una gran capacidad para desalinizar y filtrar contaminantes, incluso los iones más pequeños, lo que lo establece

como una solución prometedora para potabilizar el agua (Graphenemex, 2024a; Suk & Aluru, 2010; Yasmeen et al., 2025).

Por último, el grafeno es ideal para aplicaciones en tecnologías de la información y comunicación debido a su alta conductividad eléctrica, que permite su integración en antenas y sistemas de telecomunicaciones, incrementando la velocidad y capacidad de transmisión de datos (Hasan et al., 2016; Moon et al., 2009). Tanto por sus aplicaciones actuales como por las que se vislumbran a futuro, el grafeno sigue siendo una pieza clave en la innovación de múltiples industrias, perfilándose como un material fundamental para el desarrollo de tecnologías de próxima generación.

Conclusiones

El grafeno se ha consolidado, desde su descubrimiento en 2004 por Geim y Novoselov, como uno de los materiales más prometedores y revolucionarios de nuestra época. Su estructura, formada por una sola capa de átomos de carbono, le otorga propiedades excepcionales, como ser el material más delgado conocido, extraordinariamente resistente, flexible, transparente y un excelente conductor tanto de electricidad como de calor. Estas propiedades únicas lo distinguen de otros alótropos del carbono y lo convierten en un material con el potencial de transformar numerosos sectores.

En este trabajo se exploraron los diferentes métodos para su síntesis, desde la técnica más sencilla, como la exfoliación mecánica, hasta técnicas más escalables como la deposición química de vapor. Aunque cada método presenta ventajas y desafíos, la continua evolución de estos métodos ha permitido producir grafeno de alta calidad y de gran área, facilitando su incorporación a nivel industrial. Además, el grafeno ya está impulsando una nueva generación de tecnologías y la búsqueda de nuevos materiales 2D, expandiendo las fronteras de la ciencia de los materiales.

El impacto del grafeno abarca un amplio conjunto de aplicaciones y de campos. En la electrónica, promete dispositivos más eficientes, delgados y ultrarrápidos, como transistores, sensores, pantallas táctiles y flexibles. En el sector energético, está mejorando la capacidad, velocidad y durabilidad de las baterías, características esenciales para vehículos eléctricos y dispositivos portátiles. Como aditivo en materiales compuestos, permite generar productos más ligeros, resistentes, anticorrosivos y antimicrobianos. En medicina, se explora su uso en la liberación controlada de medicamentos y transporte de fármacos, la detección de biomarcadores y el desarrollo de biosensores. Además, su capacidad para la purificación de agua y su aplicación en tecnologías de la información y la comunicación resaltan aún más su desempeño y versatilidad. Aunque aún existen desafíos técnicos, como la producción a gran escala libre de defectos o la transferencia eficiente a distintos sustratos, el avance continuo en la investigación indica que el grafeno seguirá siendo un material clave en la construcción de un futuro tecnológico más eficiente e innovador.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

Los autores agradecen sinceramente al IPN y a la SECIHTI por el apoyo financiero para el desarrollo de este trabajo. En particular, extendemos nuestros agradecimientos a los proyectos, SIP 20253723, PRORED 20254785 y a los proyectos de Ciencia de Frontera SECIHTI CF-2023-I-1117 y SECIHTI CBF-2025-I-3719.

Referencias

- Aditivo para concreto—Graphenemex. (2023, April 11). <https://www.graphenemex.com/aplicaciones/aditivo-para-concreto/>
- An, J., Zhao, X., Zhang, Y., Liu, M., Yuan, J., Sun, X., Zhang, Z., Wang, B., Li, S., & Li, D. (2022). Perspectives of 2D Materials for Optoelectronic Integration. *Advanced Functional Materials*, 32(14), 2110119. <https://doi.org/10.1002/adfm.202110119>
- Awate, P. P., Barve, S. B., Pesode, P., & Shinde, S. S. (2023). Graphene/Al6061 nanocomposite for aerospace and automobile application. *Materials Today: Proceedings*, S2214785323039469. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.075>
- Bao, Q., Zhang, H., Wang, Y., Ni, Z., Yan, Y., Shen, Z. X., Loh, K. P., & Tang, D. Y. (2009). Atomic Layer Graphene as a Saturable Absorber for Ultrafast Pulsed Lasers. *Advanced Functional Materials*, 19(19), 3077–3083. <https://doi.org/10.1002/adfm.200901007>
- Bhuyan, Md. S. A., Uddin, Md. N., Islam, Md. M., Bipasha, F. A., & Hossain, S. S. (2016). Synthesis of graphene. *International Nano Letters*, 6(2), 65–83. <https://doi.org/10.1007/s40089-015-0176-1>
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(3), 183–191. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
- Graphenemex, E. (2022, July 28). La revolución del grafeno en la industria automotriz: Innovación en cuidado y protección de vehículos - Graphenemex. <https://www.graphenemex.com/soluciones-con-grafeno/grafeno-exfoliado/grafeno/industria-automotriz-eg/la-revolucion-del-grafeno-en-la-industria-automotriz-innovacion-en-cuidado-y-proteccion-de-vehiculos/>
- Graphenemex, E. (2024a, July 24). Innovaciones en Tecnologías del Agua—Graphenemex. <https://www.graphenemex.com/soluciones-con-grafeno/grafeno-exfoliado/grafeno/energias-limpias/innovaciones-en-tecnologias-del-agua/>

- Graphenemex, E. (2024b, September 24). El Impacto del Grafeno en la Industria del Plástico: - Graphenemex. <https://www.graphenemex.com/soluciones-con-grafeno/oxido-de-grafeno/sostenibilidad-og/el-impacto-del-grafeno-en-la-industria-del-plastico/>
- Han, T.-H., Kim, H., Kwon, S.-J., & Lee, T.-W. (2017). Graphene-based flexible electronic devices. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 118, 1–43. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2017.05.001>
- Hasan, M., Arezoomandan, S., Condori, H., & Sensale-Rodríguez, B. (2016). Graphene terahertz devices for communications applications. *Nano Communication Networks*, 10, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.nancom.2016.07.011>
- Hou, J., Shao, Y., Ellis, M. W., Moore, R. B., & Yi, B. (2011). Graphene-based electrochemical energy conversion and storage: Fuel cells, supercapacitors and lithium ion batteries. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13(34), 15384. <https://doi.org/10.1039/c1cp21915d>
- Huawei Achieves Major Breakthrough in Graphene-Assisted High Temperature Li-ion Batteries—Huawei press center. (n.d.). Huawei. Retrieved June 11, 2025, from <https://www.huawei.com/en/news/2016/12/Graphene-Assisted-Li-ion-Batteries> Huawei Community. (n.d.). Consumer.Huawei.Com. Retrieved June 11, 2025, from https://consumer.huawei.com/en/community/details/Tech-Class-15-Full-introduction-on-HUAWEI-SuperCool-technology-of-Mate-20-X/topicId_17567/
- Jia, S., Sun, H. D., Du, J. H., Zhang, Z. K., Zhang, D. D., Ma, L. P., Chen, J. S., Ma, D. G., Cheng, H. M., & Ren, W. C. (2016). Graphene oxide/graphene vertical heterostructure electrodes for highly efficient and flexible organic light emitting diodes. *Nanoscale*, 8(20), 10714–10723. <https://doi.org/10.1039/C6NR01649A>
- Lu, G., Ocola, L. E., & Chen, J. (2009). Gas detection using low-temperature reduced graphene oxide sheets. *Applied Physics Letters*, 94(8), 083111. <https://doi.org/10.1063/1.3086896>

- Martínez-López, A. L., Cruz-Bueno, J. J., Trejo-Hernández, R., Rocha-Robledo, A. K. S., de-Luna-Bugallo, A., Kudriavtsev, Y., García-Salgado, G., Casallas-Moreno, Y. L., & Mendoza-Álvarez, J. G. (2024). Impact of graphene as 2D interlayer on the growth of GaAs by CSVT on Si (100) and GaAs (100) substrates. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 181, 108605. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108605>
- Mohamed Noor, A., Amanina Mohd Zin, F., Hasenan, N., & Seong Wei, L. (2025). Graphene-Based Nanomaterials for Drug Delivery. In S. K. Swain (Ed.), *Carbon Based Nanomaterials for Drug Delivery* (pp. 229–260). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8086-0_8
- Moon, J. S., Curtis, D., Hu, M., Wong, D., McGuire, C., Campbell, P. M., Jernigan, G., Tedesco, J. L., VanMil, B., Myers-Ward, R., Eddy, C., & Gaskill, D. K. (2009). Epitaxial-Graphene RF Field-Effect Transistors on Si-Face 6H-SiC Substrates. *IEEE Electron Device Letters*, 30(6), 650–652. <https://doi.org/10.1109/LED.2009.2020699>
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., &
- & Firsov, A. A. (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306(5696), 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
- Parvez, K., Yang, S., Feng, X., & Müllen, K. (2015). Exfoliation of graphene via wet chemical routes. *Synthetic Metals*, 210, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2015.07.014>
- Priyadarsini, S., Mohanty, S., Mukherjee, S., Basu, S., & Mishra, M. (2018). Graphene and graphene oxide as nanomaterials for medicine and biology application. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 8(2), 123–137. <https://doi.org/10.1007/s40097-018-0265-6>
- Research, B. I. S. (n.d.). Graphene Composites: The Super-Material Shaping a Smarter Future. Retrieved June 11, 2025, from <https://blog.marketresearch.com/graphene-composites-the-super-material-shaping-a-smarter-future>

- Saeed, M., Alshammari, Y., Majeed, S. A., & Al-Nasrallah, E. (2020). Chemical Vapour Deposition of Graphene—Synthesis, Characterisation, and Applications: A Review. *Molecules*, 25(17), 3856. <https://doi.org/10.3390/molecules25173856>
- Santos, T. F., Souza, D. F. S., Santos, E. V., Carvalho, B. R., & Nascimento, J. H. O. (2025). Graphene and graphene quantum dots applied to batteries and supercapacitors. *Nano Trends*, 9, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.nwnano.2025.100077>
- Sengupta, J., & Hussain, C. M. (2022). Graphene-Induced Performance Enhancement of Batteries, Touch Screens, Transparent Memory, and Integrated Circuits: A Critical Review on a Decade of Developments. *Nanomaterials*, 12(18), 3146. <https://doi.org/10.3390/nano12183146>
- Subramaniam, R. T., Kasi, R., Bashir, S., & Kumar, S. A. (Eds.). (2023). *Graphene: Fabrication, Properties and Applications*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-1206-3>
- Suk, M. E., & Aluru, N. R. (2010). Water Transport through Ultrathin Graphene. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1(10), 1590–1594. <https://doi.org/10.1021/jz100240r>
- The Nobel Prize in Physics 2010. (n.d.). NobelPrize.Org. Retrieved July 1, 2025, from <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/summary/>
- Ullah, S., Yang, X., Ta, H. Q., Hasan, M., Bachmatiuk, A., Tokarska, K., Trzebicka, B., Fu, L., & Rummeli, M. H. (2021). Graphene transfer methods: A review. *Nano Research*, 14(11), 3756–3772. <https://doi.org/10.1007/s12274-021-3345-8>
- Xia, F., Mueller, T., Lin, Y., Valdes-Garcia, A., & Avouris, P. (2009). Ultrafast graphene photodetector. *Nature Nanotechnology*, 4(12), 839–843. <https://doi.org/10.1038/nnano.2009.292>
- Xiang, Z., Dai, Q., Chen, J., & Dai, L. (2016). Edge Functionalization of Graphene and TwoDimensional Covalent Organic Polymers for Energy Conversion and Storage. *Advanced Materials*, 28(29), 6253–6261. <https://doi.org/10.1002/adma.201505788>

Yasmeen, R., Khan, F. S., Nisa, W. U., Saleem, A. R., Awais, M., Jameel, M., Dara, R. N., & Khan, M. (2025). Enhanced water purification by using graphene oxide nano-membranes: A novel approach for mitigating industrial pollutant. *Carbon Trends*, 19, 100486. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100486>

Zhang, T. (2022). New Materials. In T. Zhang, *Graphene From Theory to Applications* (pp. 105–127). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4589-1_7