

Grafeno y sus aplicaciones: 20 años de aventuras

Graphene and its applications: 20 years of adventures

—

Frank Joel Villacis Amaya¹

joel-frank.v@hotmail.com • ORCID: 0009-0002-0416-745X

Zurisaddai Aram Romero²

aram.romero2@gmail.com • ORCID: 0009-0007-5060-5146

Alfredo Raya³

alfredo.raya@umich.mx • ORCID: 0000-0002-5394-8634

1 UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, QUITO, ECUADOR.

2 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE ATEMAJAC, ZAMORA DE HIDALGO, MICHOACÁN, MÉXICO.

3 FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO.

Para citar este artículo:

Villacis Amaya, F. J., Aram Romero, Z., & Raya, A. Grafeno y sus aplicaciones: 20 años de aventuras. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 15(45). <https://doi.org/10.31644/IMASD.45.2026.a03>

RESUMEN

El grafeno es un material bidimensional constituido por una monocapa de átomos de carbono organizados en una red hexagonal, con un grosor aproximado al diámetro de un solo átomo. Aislado por primera vez en 2004 por André Geim y Konstantin Novoselov —trabajo que les valió el Premio Nobel de Física en 2010—, el grafeno concentró de inmediato la atención de la comunidad científica internacional por sus propiedades extraordinarias. Estas incluyen resistencia mecánica excepcional, conductividad eléctrica y térmica sobresalientes, transparencia óptica casi total y una estabilidad química notable. Este artículo ofrece una revisión introductoria de los fundamentos físicos que explican tales propiedades, desde la teoría de bandas y la analogía con partículas relativistas hasta los fenómenos cuánticos que distinguen al grafeno de cualquier otro material conocido. Se describen los principales métodos de obtención —tanto los enfoques de arriba hacia abajo (top-down) como los de abajo hacia arriba (bottom-up)— y se presentan las aplicaciones tecnológicas más relevantes, incluyendo electrónica de alta frecuencia, sensores biomédicos, almacenamiento de energía y electrónica flexible. Asimismo, se analiza la evolución de las expectativas científicas y comerciales en torno al material, ubicándolas en el marco del ciclo de sobreexpectación de Gartner, y se reflexiona sobre las perspectivas reales que el grafeno ofrece de cara al futuro inmediato.

Palabras clave:

Grafeno; propiedades físicas; síntesis; fermiones de Dirac; aplicaciones tecnológicas; materiales bidimensionales.

— Abstract —

Graphene is a two-dimensional material consisting of a single layer of carbon atoms arranged in a hexagonal lattice, with a thickness approximately equal to the diameter of a single atom. First isolated in 2004 by André Geim and Konstantin Novoselov—work that earned them the Nobel Prize in Physics in 2010—graphene immediately attracted the attention of the international scientific community due to its extraordinary properties: exceptional mechanical strength, outstanding electrical and thermal conductivity, near-total optical transparency, and remarkable chemical stability. This article provides an introductory review of the physical principles underlying these properties, from band theory and the analogy with relativistic particles to the quantum phenomena that set graphene apart from any other known material. The main synthesis methods are described—both top-down and bottom-up approaches—along with the most relevant technological applications, including high-frequency electronics, biomedical sensors, energy storage, and flexible electronics. The evolution of scientific and commercial expectations surrounding the material is also analyzed within the framework of the Gartner hype cycle, and the realistic prospects graphene offers for the near future are examined.

Keywords:

Graphene; physical properties; synthesis; Dirac fermions; technological applications; two-dimensional materials.

El carbono es, quizás, el elemento más versátil de la tabla periódica. A lo largo de siglos de investigación científica, se han descubierto y estudiado distintas formas en que los átomos de carbono pueden organizarse para dar lugar a materiales con características radicalmente diferentes: el diamante, conocido por su dureza extrema y su transparencia; el grafito, utilizado en lápices y electrodos; los fullerenos, moléculas esféricas de carbono que revolucionaron la química a finales del siglo XX; y los nanotubos de carbono, cuya resistencia mecánica y conductividad eléctrica los colocaron en el centro de las investigaciones en nanotecnología. Sin embargo, ninguno de estos alótropos había revelado plenamente la riqueza que se esconde en una sola capa atómica de carbono, lo que hoy conocemos como grafeno (Novoselov et al., 2004).

El aislamiento experimental del grafeno en 2004 representó mucho más que un logro técnico. Reveló que es posible la existencia estable de un cristal estrictamente bidimensional —una realidad que durante décadas se había considerado termodinámicamente imposible— y abrió una ventana hacia un régimen físico completamente nuevo, en el que conceptos propios de la física de partículas elementales aparecen de forma inesperada en un material que puede manipularse con instrumentos de laboratorio convencionales (Geim & Novoselov, 2007). André Geim y Konstantin Novoselov, físicos de la Universidad de Manchester, recibieron el Premio Nobel de Física en 2010 por este descubrimiento.

Desde el punto de vista físico, el grafeno es fascinante precisamente porque en él convergen disciplinas que usualmente se estudian por separado: la teoría cuántica de campos, la mecánica cuántica de muchos cuerpos, la física del estado sólido y, de manera sorprendente, la teoría de la relatividad especial. Esta confluencia no es una mera analogía matemática, sino una consecuencia directa de la estructura cristalina del material, que impone a los electrones una dinámica efectiva descrita por ecuaciones relativistas, a pesar de que su velocidad es muy inferior a la de la luz (Castro Neto et al., 2009).

El objetivo de este artículo es presentar, con rigor conceptual y claridad divulgativa, las propiedades físicas que distinguen al grafeno, el marco teórico que las sustenta y las implicaciones tecnológicas que se derivan de ellas. Para lograrlo, el texto se organiza de la siguiente manera. Primero se describe la estructura cristalina del grafeno y sus consecuencias en la teoría de bandas. A continuación, se exploran sus propiedades mecánicas, electrónicas, térmicas y ópticas. Después se discuten los principales métodos de síntesis y producción. Finalmente, se revisan las aplicaciones actuales y emergentes, y se reflexiona sobre el estado real del material en el panorama tecnológico contemporáneo.

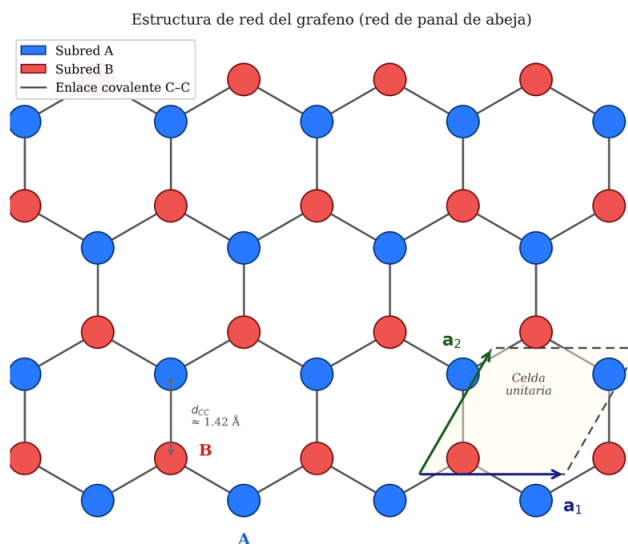


Figura 1. Estructura de red hexagonal del grafeno (red de panal de abeja). Los átomos de carbono se representan mediante círculos de color, que distinguen las dos subredes triangulares no equivalentes: en azul los de la subred A y en rojo los de la subred B; las líneas indican los enlaces covalentes σ . Se destacan los vectores primitivos a_1 y a_2 de la celda unitaria, así como los dos átomos no equivalentes A y B de la base. Fuente: Elaboración propia con base en Castro Neto et al. (2009)

1. ESTRUCTURA CRISTALINA: LA RED DE PANAL DE ABEJA

Para comprender por qué el grafeno se comporta de manera tan distinta a otros materiales, es necesario comenzar por su estructura cristalina. El grafeno consiste en una red bidimensional de átomos de carbono dispuestos en un patrón hexagonal que recuerda a un panal de abejas (Figura 1). Este arreglo, denominado red de panal de abeja (*honeycomb lattice*), no es una red de Bravais simple, sino una red triangular con una base de dos átomos no equivalentes, convencionalmente designados como A y B. Esta distinción es fundamental: los dos sitios de la red son equivalentes desde el punto de vista energético, pero no desde el geométrico, y esa diferencia tiene consecuencias profundas en el comportamiento electrónico del material (Wallace, 1947; Castro Neto et al., 2009).

La constante de red del grafeno —la distancia entre átomos más próximos— es de aproximadamente $1.42 \text{ \AA}$ (0.142 nm), y los enlaces que mantienen unidos a los átomos en el plano son del tipo sp^2 , uno de los tipos de enlace covalente más fuertes que existen en la naturaleza. Cada átomo de carbono forma tres enlaces σ con sus vecinos más cercanos, utilizando tres de sus cuatro electrones de valencia. El cuarto electrón ocupa un orbital p perpendicular al plano del material y participa en la formación de bandas π , que son precisamente las responsables de las propiedades electrónicas extraordinarias del grafeno.

El enlace covalente sp^2 no solo confiere al grafeno su notable resistencia mecánica, sino que también define la geometría perfectamente plana de la lámina en condiciones ideales. En la práctica, sin embargo, el grafeno libre exhibe pequeñas

ondulaciones espontáneas de escala nanométrica, conocidas como corrugaciones, cuya importancia termodinámica se discutirá más adelante. La combinación de un plano casi perfecto con una red altamente simétrica es la base de las demás propiedades del material.

2. MARCO FÍSICO: DE LA TEORÍA DE BANDAS A LA RELATIVIDAD EFECTIVA

2.1 *La teoría de bandas y el gap de energía*

Para apreciar lo que hace al grafeno singular, conviene situarlo en el contexto de la física del estado sólido. Cuando millones de átomos se organizan en una red cristalina periódica, los niveles de energía discretos de los átomos aislados se ensanchan y dan lugar a bandas de energía continuas. La teoría de bandas, desarrollada a lo largo del siglo XX, describe cómo se distribuyen y se pueblan estas bandas y, en consecuencia, si un material conduce la electricidad o no (Kittel, 2005).

En un metal, la banda de conducción —la banda de energías más altas ocupadas por electrones— está parcialmente llena, lo que permite que estos se muevan libremente bajo la acción de un campo eléctrico. En un aislante, existe una brecha de energía prohibida (gap) grande entre la banda de valencia completamente llena y la banda de conducción completamente vacía. Los semiconductores son casos intermedios en los que el gap es moderado: a temperatura ambiente, una pequeña fracción de electrones puede cruzarlo por agitación térmica, dotando al material de una conductividad limitada pero controlable. El silicio, material fundamental de la electrónica moderna, es el ejemplo por excelencia de un semiconductor.

El grafeno ocupa una categoría sin precedentes en esta clasificación. Su gap de energía es nulo: la banda de valencia y la banda de conducción se tocan en puntos específicos del espacio recíproco, pero sin solaparse. Esto lo convierte técnicamente en un semimetal, aunque su comportamiento electrónico en esos puntos de contacto es tan inusual que merece una descripción completamente distinta.

2.2 *Los puntos de Dirac y la dispersión lineal*

La zona de Brillouin del grafeno —la celda unitaria en el espacio recíproco— es hexagonal, y en sus vértices se encuentran los denominados puntos de Dirac, designados K y K' (también conocidos como valles). Además de los vértices, la Figura 2 identifica otros dos puntos de alta simetría de la zona de Brillouin: el centro, denotado Γ , que corresponde a momento nulo ($k = 0$), y los puntos M , situados en los puntos medios de las aristas del hexágono, que corresponden a los puntos de silla de la estructura de bandas donde se localizan las singularidades de van Hove. Cerca de estos puntos, la relación entre la energía E y el momento k de los electrones no sigue la dependencia cuadrática habitual que se observa en la mayoría de los materiales:

$$E = \hbar^2 k^2 / (2m^*) \quad (1)$$

sino que es lineal:

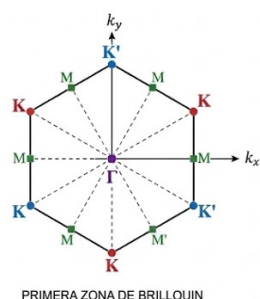
$$E = \pm \hbar v_F |k| \quad (2)$$

donde $v_F \approx 10^6$ m/s es la velocidad de Fermi del grafeno, aproximadamente 300 veces menor que la velocidad de la luz, y k es el vector de onda medido desde el punto de Dirac. Esta dispersión lineal es la firma característica de las partículas relativistas sin masa descritas por la ecuación de Dirac, razón por la cual los portadores de carga en el grafeno —tanto electrones como huecos— se denominan fermiones de Dirac sin masa efectiva (Novoselov et al., 2005; Zhang et al., 2005).

Es fundamental subrayar que los electrones del grafeno no se vuelven relativistas en el sentido convencional: su velocidad real es muy inferior a la de la luz y su masa en reposo, en términos absolutos, es la misma que en cualquier otro material. Lo que ocurre es que su dinámica efectiva dentro del cristal —la forma en la que responden a fuerzas externas y se propagan por la red— obedece ecuaciones matemáticamente idénticas a las de partículas que viajan a la velocidad de la luz. Esta analogía no es trivial: tiene consecuencias experimentales verificables y convierte al grafeno en un laboratorio accesible para explorar fenómenos de la física de altas energías en condiciones de temperatura ambiente (Katsnelson, 2012).

ESTRUCTURA DE BANDAS ELECTRÓNICAS DEL GRAFENO

(a) PRIMERA ZONA DE BRILLOUIN



(b) ESTRUCTURA DE BANDAS DEL GRAFENO

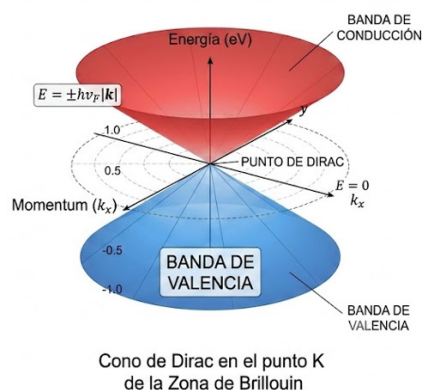


Figura 2. Estructura de bandas del grafeno. Se muestra la zona de Brillouin hexagonal con los puntos K y K'. En la ampliación se ilustra el cono de Dirac: la dispersión lineal de energía en función del momento cercano a un punto K, con la banda de valencia (cono inferior) y la banda de conducción (cono superior) tocándose en el punto de Dirac. Fuente: Elaboración propia con base en Castro Neto et al. (2009)

2.3 El grafeno como laboratorio de física relativista

La analogía relativista del grafeno tiene consecuencias observables. Una de las más llamativas es el efecto túnel de Klein, predicho originalmente por el físico Oskar Klein en 1929 para partículas relativistas. Klein demostró que, a diferencia de los electrones ordinarios —que tienen una probabilidad exponencialmente pequeña de atravesar una barrera de potencial alta y ancha—, los fermiones relativistas sin masa pueden cruzar barreras de potencial arbitrariamente altas con probabilidad de transmisión prácticamente igual a uno (Klein, 1929). En el grafeno, este fenómeno se manifiesta como la imposibilidad de confinar electrones mediante barreras electrostáticas convencionales, lo cual tiene implicaciones importantes para el diseño de transistores basados en este material (Katsnelson et al., 2006).

Otro fenómeno de naturaleza cuántica que distingue al grafeno es el efecto Hall cuántico. En materiales convencionales, este efecto —la aparición de una resistencia transversal cuantizada bajo la acción de un campo magnético intenso— solo se observa a temperaturas criogénicas. En el grafeno, puede detectarse incluso a temperatura ambiente, lo que refleja la robustez de los estados cuánticos asociados a su estructura de bandas (Novoselov et al., 2007). Más aún, el grafeno exhibe una versión anómala de este efecto, con secuencias de cuantización diferentes a las de los materiales convencionales, atribuibles a la naturaleza Dirac de sus portadores.

Esta correspondencia convierte al grafeno en algo más que una curiosidad conceptual: lo transforma en un laboratorio de mesa donde predicciones de la electrodinámica cuántica, difíciles o imposibles de someter a prueba en los aceleradores de partículas, se vuelven accesibles con instrumentación de estado sólido. El Zitterbewegung —el temblor cuántico que la teoría de Dirac atribuye a las partículas relativistas—, la polarización del vacío en torno a una carga y la propia paradoja de Klein encuentran en las láminas de carbono una realización experimental a energías ordinarias y temperatura ambiente. En este sentido el material actúa como un puente entre la física de la materia condensada y la física de altas energías, en el que ideas concebidas para el mundo subatómico pueden contrastarse sobre una mesa de laboratorio (Katsnelson & Novoselov, 2007).

3. PROPIEDADES FÍSICAS FUNDAMENTALES DEL GRAFENO

3.1 Propiedades electrónicas: movilidad y transporte

Una de las características más extraordinarias del grafeno desde el punto de vista tecnológico es su movilidad electrónica: la facilidad con que los portadores de carga aceleran en respuesta a un campo eléctrico. La movilidad se mide en unidades de $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, y el silicio —el material más utilizado en electrónica— presenta valores típicos de alrededor de $1400 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ para los electrones. En grafeno de alta calidad, a temperatura ambiente y sobre un sustrato de SiO_2 , se han medido

movilidades de hasta $10000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, y en muestras suspendidas —sin contacto con ningún sustrato— se han alcanzado valores superiores a $200000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$.

Esta movilidad extraordinaria se origina en dos factores: la baja dispersión de los electrones —producida por la casi perfecta regularidad de la red cristalina y la ausencia de impurezas en muestras de alta calidad— y la velocidad de Fermi elevada inherente a la dispersión lineal. Una consecuencia directa es el transporte balístico: en muestras suficientemente puras y a escalas del orden de la micra, los electrones pueden recorrer distancias apreciables sin sufrir colisiones significativas con defectos o vibraciones de la red (fonones). Este régimen permite estudiar fenómenos cuánticos coherentes de gran interés fundamental y abre la puerta al diseño de dispositivos electrónicos de consumo energético muy bajo.

3.2 Propiedades mecánicas: el material más resistente conocido

El grafeno ostenta un módulo de Young de aproximadamente 1.0 TPa , lo que lo sitúa como uno de los materiales estructuralmente más rígidos que se conocen, superior al acero en aproximadamente dos órdenes de magnitud cuando se normaliza por la densidad superficial. Esta rigidez extrema es consecuencia directa de la fortaleza de los enlaces covalentes C-C de tipo sp^2 , que requieren cantidades considerables de energía para deformarse.

Una característica aparentemente paradójica es que esta dureza excepcional coexiste con una notable flexibilidad macroscópica. Una lámina de grafeno puede curvarse, doblarse y enrollarse sin que su estructura cristalina se rompa, siempre que las deformaciones no superen ciertos umbrales. Esta combinación de resistencia y flexibilidad ha motivado el interés en aplicaciones de electrónica flexible: dispositivos que se doblan con el cuerpo, pantallas enrollables y sensores conformables que se adhieren a superficies curvas.

La resistencia a la fractura también es notable. Mediciones de nanoindentación realizadas con microscopía de fuerza atómica han determinado que una capa de grafeno puede soportar presiones de hasta 130 GPa antes de romperse, lo que lo convierte en el material más resistente medido hasta la fecha. Para poner esta cifra en perspectiva, el acero de alta calidad comienza a deformarse irreversiblemente a presiones unas 200 veces menores.

3.3 Conductividad térmica

La conductividad térmica del grafeno, medida dentro del plano de la lámina, puede alcanzar valores de entre 3000 y $5000 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a temperatura ambiente, superando a cualquier otro material conocido, incluido el diamante (aproximadamente $2000 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) y el cobre ($400 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Este transporte de calor excepcionalmente eficiente se debe fundamentalmente a la propagación de fonones acústicos a lo largo de la red hexagonal perfectamente regular, con muy poca dispersión en muestras sin defectos.

Desde el punto de vista aplicado, esta propiedad convierte al grafeno en un candidato ideal para la gestión del calor en dispositivos electrónicos miniaturizados. El sobrecalentamiento es uno de los principales factores limitantes en la miniaturización de chips y procesadores; la integración de capas de grafeno como disipadores térmicos podría extender los límites actuales de densidad de integración.

3.4 Transparencia óptica y conductividad simultánea

Una lámina de grafeno absorbe exactamente un 2.3 % de la luz visible incidente, un valor sorprendentemente preciso que resulta de un cálculo teórico directo a partir de la constante de estructura fina $\alpha \approx 1/137$, una de las constantes fundamentales de la física (Nair et al., 2008):

$$A = \pi\alpha \approx 2.3 \% \quad (3)$$

Esto significa que el grafeno es prácticamente transparente: con una sola capa atómica se absorbe apenas una fracción minúscula de la luz, lo que lo hace visible a simple vista sobre sustratos adecuados solo gracias a la interferencia óptica. Más significativo aún es que esta transparencia coexiste con una conductividad eléctrica considerable, una combinación que prácticamente no existe en ningún otro material y que lo convierte en el candidato ideal para electrodos transparentes en pantallas táctiles, células fotovoltaicas y LEDs.

Los materiales actualmente usados como electrodos transparentes, principalmente el óxido de indio-estaño (ITO, por sus siglas en inglés), son frágiles, costosos y fabricados con materiales críticos cuya disponibilidad a largo plazo es incierta. El grafeno, por el contrario, es flexible, relativamente abundante en forma de carbono, y sus propiedades ópticas y eléctricas pueden ajustarse mediante dopaje o funcionalización química.

4. ESTABILIDAD DE UN CRISTAL BIDIMENSIONAL: EL PROBLEMA DE MERMIN-WAGNER

Cuando Geim y Novoselov aislaron el grafeno en 2004, su descubrimiento desafió una convicción teórica bien establecida. En los años 1960, los físicos David Mermin y Herbert Wagner demostraron que un cristal perfectamente bidimensional no puede existir de forma estable a temperatura finita, porque las fluctuaciones térmicas destruirían inevitablemente el orden de largo alcance de la red. El grafeno, sin embargo, existe y es estable. ¿Cómo es posible?

La respuesta reside en que el grafeno real no es perfectamente plano. Observaciones mediante microscopía electrónica y de fuerza atómica han revelado que las láminas de grafeno libre presentan ondulaciones espontáneas de amplitud nanométrica, que fluctúan en la dirección perpendicular al plano. Estas corrugaciones

no son un defecto del material sino un mecanismo de estabilización: al curvar la lámina en la tercera dimensión, el sistema aprovecha los grados de libertad fuera del plano para minimizar la energía libre y resistir las perturbaciones térmicas.

Este fenómeno tiene implicaciones prácticas. Las corrugaciones afectan la movilidad de los portadores de carga —porque crean potenciales locales que dispersan los electrones— y modifican las propiedades mecánicas locales del material. En grafeno depositado sobre un sustrato, las interacciones con la superficie reducen las ondulaciones y pueden cambiar las propiedades electrónicas de manera significativa, lo que hace que el entorno del grafeno sea un parámetro de diseño crítico en las aplicaciones.

5. MÉTODOS DE SÍNTESIS Y PRODUCCIÓN DE GRAFENO

Uno de los desafíos centrales que ha enfrentado la investigación sobre grafeno desde su descubrimiento es la producción del material en cantidades suficientes, con la calidad adecuada y a un costo viable. La forma en que se obtiene el grafeno influye directamente en su estructura, sus defectos, sus propiedades electrónicas y, en consecuencia, en las aplicaciones para las que resulta adecuado. Los métodos de síntesis (Figura 3) se clasifican en dos grandes categorías: los métodos de arriba hacia abajo (*top-down*), que parten de materiales macroscópicos ricos en carbono para separar capas individuales, y los métodos de abajo hacia arriba (*bottom-up*), que construyen la lámina de grafeno átomo a átomo a partir de precursores moleculares.

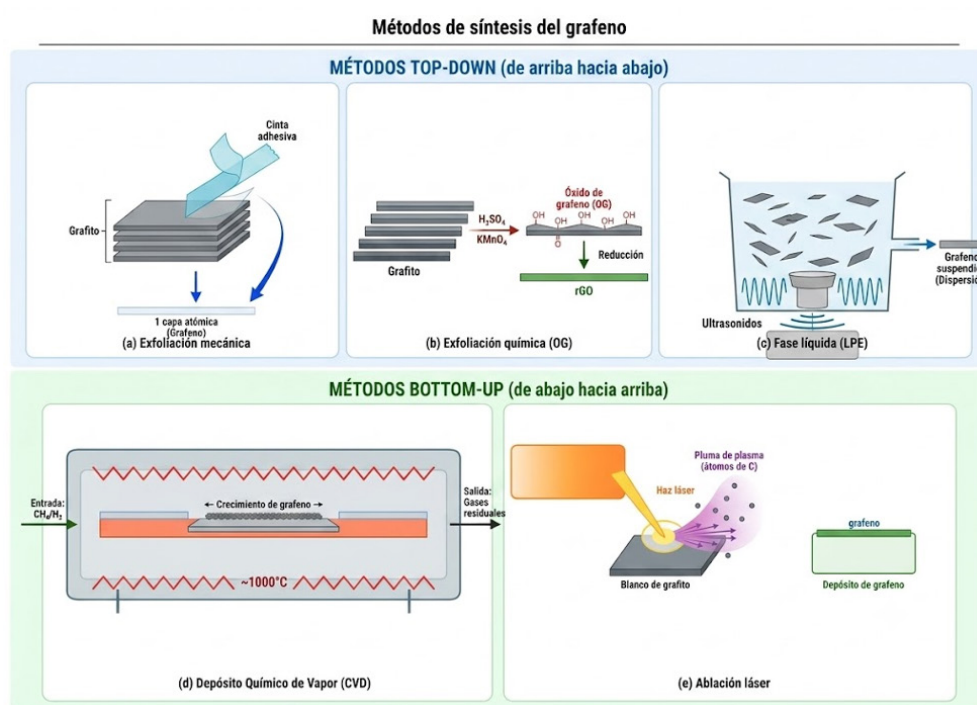


Figura 3. Comparación esquemática de los enfoques *top-down* y *bottom-up* para la síntesis de grafeno. En el panel superior se ilustran los métodos *top-down*: exfoliación mecánica con cinta adhesiva a partir de grafito, exfoliación química mediante oxidación-reducción, y exfoliación en fase líquida. En el panel inferior se ilustran los métodos *bottom-up*: depósito químico de vapor (CVD) sobre un sustrato metálico catalizador y ablación láser. Fuente: Elaboración propia con base en Hutapea et al. (2025)

5.1 Métodos *top-down*

5.1.1 Exfoliación mecánica

La exfoliación mecánica es históricamente el primer método empleado para aislar grafeno y fue precisamente el que utilizaron Geim y Novoselov en sus experimentos originales. El principio es muy simple: se aplica cinta adhesiva sobre la superficie de un cristal de grafito de alta calidad (HOPG, grafito pirolítico altamente orientado) y se despegan sucesivamente capas de material hasta obtener láminas de uno o pocos átomos de grosor, que después se transfieren a un sustrato de SiO_2 para su caracterización (Novoselov et al., 2004).

El proceso explota la anisotropía del grafito: los enlaces covalentes que unen a los átomos dentro de cada capa son aproximadamente 40 veces más fuertes que las fuerzas de van der Waals que mantienen unidas las capas entre sí. La energía de unión intercapas es del orden de 2 eV/nm^2 , lo que permite separarlas con fuerzas mecánicas moderadas sin romper la estructura hexagonal interna. El resultado es grafeno de extraordinaria calidad cristalina, con movibilidades electrónicas entre las más altas reportadas y prácticamente libre de defectos. Sin embargo, las láminas

producidas son pequeñas —típicamente de decenas a pocas centenas de micrómetros cuadrados— y el proceso es completamente manual, lo que lo hace inviable para producción industrial a gran escala.

5.1.2 Exfoliación química: del óxido de grafeno al grafeno reducido

La exfoliación química del grafito busca superar las limitaciones de escala de la técnica mecánica aprovechando reacciones de oxidación-reducción. El proceso comienza con la oxidación del grafito utilizando mezclas de ácidos fuertes y agentes oxidantes, como ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido nítrico (HNO_3) y permanganato de potasio (KMnO_4) que aumenta el espaciado intercapas y debilita las fuerzas que las unen hasta el punto en que una simple sonicación en medio acuoso permite exfoliar el material en nanohojas individuales de óxido de grafeno (OG).

Una vez obtenido el OG, éste debe someterse a una etapa de reducción para restituir parcialmente las propiedades eléctricas del grafeno original. Los agentes reductores más utilizados incluyen hidracina (N_2H_4), borohidruro de sodio (NaBH_4) y varios métodos de reducción térmica. El producto resultante, óxido de grafeno reducido (rGO), presenta propiedades eléctricas superiores al OG pero inferiores al grafeno exfoliado mecánicamente, debido a que el proceso de oxidación introduce defectos estructurales irreversibles. No obstante, la escala de producción potencial y el bajo costo hacen al rGO atractivo para aplicaciones como materiales compuestos, recubrimientos conductores y dispositivos de almacenamiento electroquímico de energía.

5.1.3 Exfoliación en fase líquida

La exfoliación en fase líquida (LPE, por sus siglas en inglés) consiste en dispersar grafito en un solvente adecuado y aplicar energía mecánica —usualmente mediante sonicación ultrasónica o cizallamiento de alta velocidad— para separar las capas y obtener suspensiones coloidales de grafeno de pocas capas. La clave del proceso es la elección del solvente: este debe tener una tensión superficial y un parámetro de solubilidad compatibles con los del grafeno para minimizar la energía necesaria para mantener las capas separadas y evitar su reaglomeración.

La LPE produce grafeno con una densidad de defectos relativamente baja en comparación con la exfoliación química, es compatible con procesos de fabricación tipo rollo a rollo (roll-to-roll) y resulta adecuada para la producción de tintas conductoras y recubrimientos funcionales. Sus principales limitaciones son el tamaño lateral reducido de las láminas obtenidas y la distribución heterogénea en número de capas.

5.1.4 Desenrollado de nanotubos de carbono

Un método menos convencional pero conceptualmente elegante consiste en desenrollar nanotubos de carbono para obtener nanocintas de grafeno (GNR, graphene nanoribbons). Los nanotubos de carbono pueden visualizarse como láminas de grafeno enrolladas sobre sí mismas; al cortar estos tubos longitudinalmente, se despliegan en cintas planas de grafeno con anchuras bien definidas. El corte puede realizarse mediante oxidación química controlada, exposición a plasma, tratamientos electroquímicos o métodos mecánicos asistidos. La anchura de la nanocinta obtenida puede controlarse eligiendo el diámetro del nanotubo precursor, lo que es especialmente valioso porque las nanocintas delgadas exhiben un gap de energía finito inducido por el confinamiento cuántico lateral, a diferencia del grafeno de anchura infinita.

5.2 Métodos *bottom-up*

5.2.1 Depósito químico de vapor (CVD)

El depósito químico de vapor (CVD, chemical vapor deposition) se ha consolidado como el método más prometedor para la producción de grafeno de alta calidad a escalas compatibles con aplicaciones industriales. En este proceso (Figura 4), un gas precursor rico en carbono —generalmente metano (CH_4), a veces combinado con hidrógeno (H_2)— se introduce en una cámara de reacción a temperaturas elevadas, típicamente entre 900 °C y 1 100 °C. En estas condiciones, las moléculas del precursor se descomponen catalíticamente sobre la superficie de un sustrato metálico —habitualmente cobre o níquel— liberando átomos de carbono que migran sobre la superficie hasta incorporarse a una red hexagonal creciente.

El cobre es el sustrato catalítico preferido porque su interacción con el carbono es débil y autoterminante: una vez que se forma una monocapa completa de grafeno, el proceso de crecimiento se detiene, lo que facilita la obtención de grafeno predominantemente monocapa sobre grandes áreas. Después del crecimiento, el grafeno debe transferirse del sustrato metálico al sustrato final de interés, generalmente mediante la disolución química del cobre, un paso que puede introducir contaminaciones o roturas en la lámina y que representa uno de los principales retos técnicos del proceso.

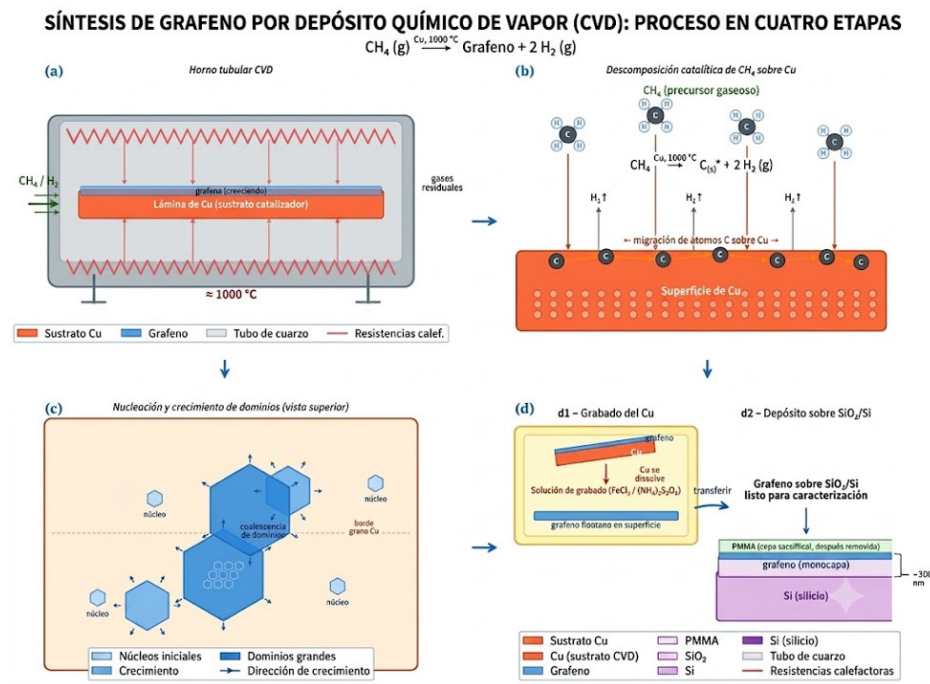


Figura 4. Esquema del proceso de depósito químico de vapor (CVD) para la síntesis de grafeno. Se ilustran las etapas: (a) flujo del gas precursor (CH_4/H_2) sobre el sustrato de cobre a alta temperatura; (b) descomposición catalítica de las moléculas y nucleación de dominios de grafeno; (c) crecimiento y coalescencia de los dominios hasta cubrir el sustrato; (d) transferencia del grafeno al sustrato final mediante disolución del cobre. Fuente: Elaboración propia con base en Bae et al. (2010)

5.2.2 Ablación láser

La ablación láser para la síntesis de grafeno consiste en irradiar un material sólido rico en carbono —típicamente grafito— con pulsos de láser de alta intensidad. La energía aportada por el láser es suficiente para romper los enlaces C-C superficiales, generando una pluma de plasma con átomos y fragmentos de carbono que se depositan sobre un sustrato receptor donde pueden reorganizarse en láminas de grafeno. La calidad del material obtenido depende de factores como la longitud de onda del láser, la duración de los pulsos, la distancia entre el blanco y el sustrato, y la temperatura de este último.

La ablación láser produce grafeno de alta pureza química, sin residuos de solventes ni catalizadores metálicos, lo que la hace atractiva para aplicaciones biomédicas y espectroscópicas. Su principal limitación es la dificultad para obtener láminas de gran área y el elevado costo de los sistemas de láser de alta potencia, que dificultan su escalado industrial.

6. APLICACIONES TECNOLÓGICAS ACTUALES Y EMERGENTES

Las propiedades únicas del grafeno han estimulado una enorme actividad de investigación orientada a su integración en tecnologías de alto impacto. No todas las aplicaciones han alcanzado el mismo nivel de madurez tecnológica: algunas ya están disponibles comercialmente, otras se encuentran en etapas avanzadas de desarrollo, y varias permanecen en el ámbito de la investigación básica. A continuación, se describen las áreas de aplicación más relevantes, organizadas según el estado actual de su desarrollo.

6.1 Electrónica de alta frecuencia

La movilidad electrónica excepcional del grafeno, superior a la del silicio en uno o dos órdenes de magnitud, lo convierte en candidato natural para transistores de efecto campo (FET) que operen a frecuencias de radiofrecuencia y de microondas. IBM y otras empresas tecnológicas han demostrado transistores de grafeno con frecuencias de corte superiores a 100 GHz, muy por encima de los dispositivos de silicio comparables (Lin et al., 2010). Sin embargo, la ausencia de un gap de energía natural en el grafeno impide apagar completamente el dispositivo, lo que limita su uso en lógica digital convencional. Diversas estrategias se han propuesto para abrir un gap controlado: el confinamiento lateral en nanocintas, el dopaje químico y la ingeniería de tensiones mecánicas.

6.2 Sensores

La extrema sensibilidad del grafeno a su entorno químico —incluyendo la posibilidad de detectar la adsorción de moléculas individuales sobre su superficie mediante cambios en la resistividad eléctrica— lo convierte en una plataforma ideal para sensores de alta sensibilidad. Se han demostrado sensores de grafeno para la detección de gases tóxicos como el NO_2 o el NH_3 a nivel de partes por millón o incluso de moléculas individuales. En el ámbito biomédico, electrodos flexibles de grafeno integrados en parches cutáneos permiten monitorizar en tiempo real señales biológicas como la glucosa, el lactato o el potencial cardíaco sin necesidad de extracción de sangre.

Otro avance notable son los implantes neuronales de grafeno: electrodos ultradelgados que, gracias a la biocompatibilidad y la flexibilidad mecánica del material, causan un daño tisular mínimo al implantarse en el cerebro y permiten registrar la actividad eléctrica con resolución espacial y temporal superior a la de los electrodos convencionales. Estas aplicaciones representan uno de los campos de mayor crecimiento en la interfaz entre la nanotecnología y la medicina.

6.3 Almacenamiento de energía

El grafeno y sus derivados han mostrado un potencial significativo para mejorar el rendimiento de las baterías de litio-ion y los supercapacitores. En las baterías, la incorporación de grafeno en los electrodos mejora la conductividad eléctrica, la capacidad de almacenamiento de carga y la velocidad de carga/descarga. En los supercapacitores —dispositivos que almacenan energía en la interfaz electrodo-electrolito y pueden cargarse y descargarse mucho más rápido que las baterías convencionales—, el grafeno proporciona un área superficial específica extraordinariamente alta (hasta $2630 \text{ m}^2/\text{g}$ en la lámina ideal), lo que maximiza la capacidad de almacenamiento electrostático.

6.4 Electrónica flexible y transparente

La combinación de flexibilidad mecánica, conductividad eléctrica y transparencia óptica posiciona al grafeno como el material del futuro para la fabricación de electrodos transparentes en pantallas táctiles, células solares y diodos emisores de luz orgánicos (OLED). Investigadores de la Universidad de Sungkyunkwan han demostrado ya la fabricación de pantallas táctiles basadas en grafeno CVD de gran área que son comparables al ITO en términos de rendimiento óptico y eléctrico, pero significativamente más flexibles y potencialmente más baratas (Bae et al., 2010). Este es el segmento en el que la comercialización de grafeno es la más avanzada.

6.5 Filtración y purificación de agua

Las membranas de óxido de grafeno presentan permeabilidades al agua y tasas de rechazo de iones ajustables mediante el control del espaciado entre capas y la funcionalización química de su superficie. El OG en láminas tiene la propiedad de permitir el paso de moléculas de agua a una velocidad varios órdenes de magnitud mayor que la esperada para su tamaño, mientras rechaza efectivamente iones y moléculas más grandes. Esta propiedad ha estimulado la investigación de membranas de grafeno para la desalinización del agua del mar y la purificación de agua industrial, con potencial impacto en las crisis de agua dulce que afectan a múltiples regiones del planeta.

6.6 Espintrónica y computación cuántica

Los electrones poseen una propiedad intrínseca denominada espín, análoga a la de una pequeña brújula que puede apuntar hacia arriba o hacia abajo. La espintrónica es la disciplina que busca utilizar el espín, además de la carga eléctrica, como portador de información. El grafeno exhibe un tiempo de coherencia del espín excepcionalmente largo —es decir, el espín mantiene su orientación durante

periodos relativamente prolongados antes de ser perturbado— lo que lo convierte en un candidato para componentes espintrónicos y, a más largo plazo, para elementos de información cuántica. Estos son, en la actualidad, temas de investigación académica, pero con potencial transformador en la electrónica del futuro.

7. EL CICLO DE SOBREEEXPECTACIÓN Y LA REALIDAD DEL GRAFENO

El descubrimiento del grafeno desencadenó una ola de entusiasmo en medios de comunicación y en parte de la comunidad científica que, en algunos casos, fue desproporcionada respecto a las posibilidades reales del material en los plazos sugeridos. Se habló de revoluciones inmediatas en electrónica, medicina, energía y materiales de construcción, lo que generó expectativas que el grafeno no pudo cumplir en los plazos que se habían anticipado. Este fenómeno corresponde a lo que Gartner, Inc. describe como el "ciclo de sobreexpectación tecnológica" (*hype cycle*) (Figura 5): una secuencia característica que atraviesan muchas tecnologías emergentes, con una fase inicial de entusiasmo desorbitado, seguida de una caída en el desencanto y una eventual meseta de productividad en la que el valor real de la tecnología se manifiesta de forma sostenida (Gartner, 2023).

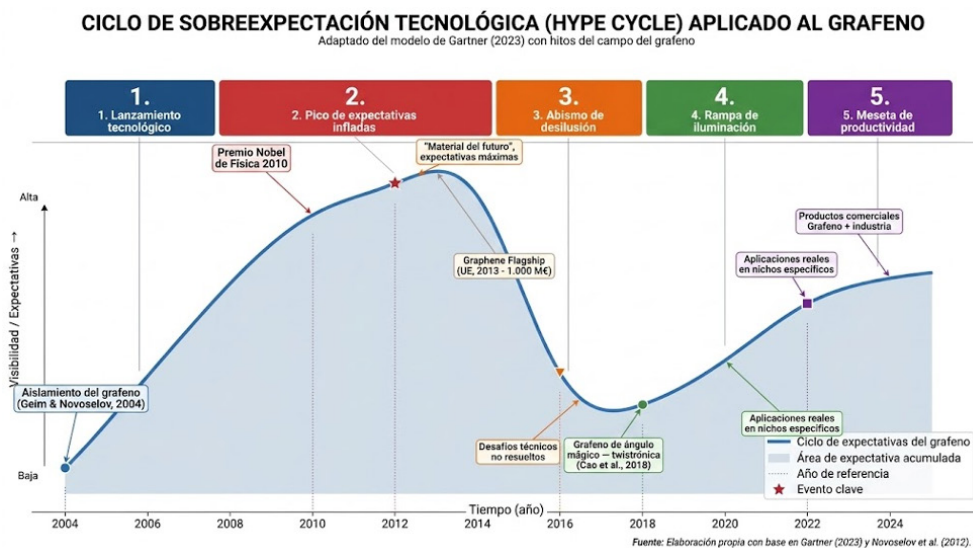


Figura 5. Curva del ciclo de sobreexpectación de Gartner (Hype Cycle) aplicada al grafeno. El eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical la visibilidad o expectativas. Se marcan las cinco fases: (1) Lanzamiento tecnológico (2004, aislamiento del grafeno); (2) Pico de expectativas infladas (2010-2014, tras el Premio Nobel); (3) Abismo de desilusión (2015-2018); (4) Rampa de iluminación (2018-2022); (5) Meseta de productividad (2022-presente). Fuente: Elaboración propia con base en Gartner (2023) y Novoselov et al. (2012)

El grafeno alcanzó su pico de sobreexpectación aproximadamente entre 2010 y 2014, coincidiendo con el otorgamiento del Premio Nobel y una avalancha de publicaciones científicas y anuncios de empresas que afirmaban tener aplicaciones comerciales inminentes. La desilusión llegó cuando quedó claro que los desafíos

técnicos para integrar el grafeno en dispositivos reales —la apertura de un gap de energía, la producción masiva de material de alta calidad, la compatibilidad con los procesos de fabricación existentes y la transferencia confiable de láminas CVD— eran más difíciles de resolver de lo previsto.

En la actualidad, el grafeno se encuentra en lo que Gartner denomina la "rampa de iluminación" o incluso en los primeros estadios de la "meseta de productividad": los avances son más modestos pero sólidos y crecientes. Productos comerciales que incorporan grafeno ya existen en el mercado —recubrimientos anticorrosión para estructuras marinas, aditivos en pinturas industriales, baterías con mejores tasas de carga, electrodos en equipos de tenis y ciclismo de alta gama—, y las aplicaciones en electrónica flexible y sensores biomédicos avanzan hacia la comercialización. El grafeno no "sustituyó al silicio" ni "cambió el mundo" en una década, pero sí ha comenzado a transformar silenciosamente nichos específicos y a habilitar tecnologías que sin él serían imposibles.

Esta evolución es coherente con la historia de otros materiales revolucionarios: el silicio mismo tardó décadas desde su descubrimiento científico hasta su masificación en la electrónica de consumo, y los plásticos sintéticos, descubiertos a principios del siglo XX, no dominaron la industria de empaques hasta los años 1950 y 1960. La ciencia de materiales opera en escalas de tiempo largas, y el verdadero impacto del grafeno aún está, en buena medida, por escribirse.

8. PERSPECTIVAS Y DESAFÍOS FUTUROS

El futuro del grafeno como material tecnológicamente relevante pasa por resolver una serie de desafíos que actualmente limitan su adopción masiva. En el plano de la producción, el reto central es obtener material de alta calidad electrónica en grandes cantidades y a costos competitivos. El CVD ha demostrado ser el método más prometedor para esto, pero los procesos de transferencia del metal sustrato al soporte final siguen siendo un cuello de botella. Métodos alternativos de transferencia libre de grabado químico —como el despegado mecánico directo o el uso de polímeros sacrificiales— están siendo activamente investigados.

En el plano de la ingeniería de dispositivos, el problema del gap de energía sigue siendo central para la electrónica lógica. La ingeniería de estrés mecánico —la deformación controlada de la lámina de grafeno para modificar su estructura de bandas— es una de las estrategias más activas en esta dirección, y constituye una de las áreas de investigación en las que algunos de los autores del presente artículo trabaja activamente. Otras estrategias incluyen el desarrollo de heteroestructuras: láminas de grafeno apiladas con otros materiales bidimensionales como el nitruro de boro hexagonal (hBN), el disulfuro de molibdeno (MoS_2) o el fosforeno, formando estructuras tipo van der Waals que combinan propiedades complementarias.

Las heteroestructuras de van der Waals representan, quizás, la frontera más emocionante de la investigación actual en materiales bidimensionales. En 2018, la

observación de superconductividad en grafeno bicapa girado a un ángulo "mágico" de aproximadamente 1.1° —el denominado grafeno de ángulo mágico o magic-angle graphene— abrió un campo completamente nuevo: la twistrónica, que estudia cómo la rotación relativa entre capas de materiales 2D genera propiedades emergentes sin precedente (Cao et al., 2018). Este hallazgo, completamente inesperado, es un recordatorio de que el grafeno y los materiales bidimensionales en general siguen siendo una fuente de sorpresas fundamentales.

A largo plazo, las áreas en las que el grafeno tiene mayores posibilidades de impacto transformador incluyen la filtración y desalinización de agua —donde las membranas de grafeno podrían reducir drásticamente el consumo energético de los procesos de purificación—, la medicina de precisión —con implantes neuronales, biosensores integrados y sistemas de administración controlada de fármacos—, la energía sostenible —con electrodos de mayor capacidad y durabilidad para baterías de próxima generación— y la espintrónica cuántica —donde el grafeno podría ser un componente clave en los procesadores cuánticos del futuro.

CONCLUSIONES

El grafeno no es simplemente un material con propiedades extraordinarias: es un sistema físico que obliga a reconsiderar algunas de las categorías más establecidas de la física del estado sólido y demuestra, de manera contundente, cómo la reducción dimensional puede generar fenómenos emergentes completamente inesperados. En una sola capa atómica convergen la teoría cuántica de campos efectiva, la física del estado sólido clásica, la estabilidad termodinámica no trivial y un potencial tecnológico de amplísimo alcance.

El camino del grafeno desde el laboratorio al mercado ha sido más largo y sinuoso de lo que el entusiasmo inicial suponía, pero no por ello menos prometedor. Las aplicaciones que hoy existen —aunque modestas frente a las expectativas de hace una década— son reales, crecientes y en algunos casos genuinamente transformadoras. La investigación fundamental sobre grafeno y sobre los materiales bidimensionales que su descubrimiento inspiró sigue arrojando hallazgos de primer orden, como lo ilustra el caso del grafeno de ángulo mágico y la superconductividad no convencional.

El grafeno es, en definitiva, mucho más que el "material del futuro" que proclamaron los medios de comunicación en los años posteriores a 2004. Es, sobre todo, una ventana hacia una nueva forma de entender y diseñar la materia: por capas, por ángulos, por defectos controlados, por heteroestructuras ingenieras átomo a átomo. En ese sentido, su impacto más duradero puede no medirse en toneladas producidas o en dispositivos vendidos, sino en la transformación que ha operado en nuestra manera de concebir los materiales del siglo XXI.

REFERENCIAS

- Bae, S., Kim, H., Lee, Y., Xu, X., Park, J. S., Zheng, Y., ... Kim, K. S. (2010). Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. *Nature Nanotechnology*, 5(8), 574–578. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.132>
- Cao, Y., Fatemi, V., Fang, S., Watanabe, K., Taniguchi, T., Kaxiras, E., & Jarillo-Herrero, P. (2018). Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. *Nature*, 556(7699), 43–50. <https://doi.org/10.1038/nature26160>
- Castro Neto, A. H., Guinea, F., Peres, N. M. R., Novoselov, K. S., & Geim, A. K. (2009). The electronic properties of graphene. *Reviews of Modern Physics*, 81(1), 109–162. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.109>
- Gartner, Inc. (2023). *Gartner hype cycle*. <https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle>
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(3), 183–191. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
- Hutapea, J. A. A., Manik, Y. G. O., Ndruru, S. T. C. L., Huang, J., Goei, R., Tok, A. I. Y., & Siburian, R. (2025). Comprehensive review of graphene synthesis techniques: Advancements, challenges, and future directions. *Micro*, 5(3), 40. <https://doi.org/10.3390/micro5030040>
- Katsnelson, M. I. (2012). *Graphene: Carbon in two dimensions*. Cambridge University Press.
- Katsnelson, M. I., & Novoselov, K. S. (2007). Graphene: New bridge between condensed matter physics and quantum electrodynamics. *Solid State Communications*, 143(1–2), 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.02.043>
- Katsnelson, M. I., Novoselov, K. S., & Geim, A. K. (2006). Chiral tunnelling and the Klein paradox in graphene. *Nature Physics*, 2(9), 620–625. <https://doi.org/10.1038/nphys384>
- Kittel, C. (2005). *Introduction to solid state physics* (8th ed.). Wiley.
- Klein, O. (1929). Die Reflexion von Elektronen an einem Potentialsprung nach der relativistischen Dynamik von Dirac. *Zeitschrift für Physik*, 53(3–4), 157–165. <https://doi.org/10.1007/BF01339716>
- Lin, Y. M., Dimitrakopoulos, C., Jenkins, K. A., Farmer, D. B., Chiu, H. Y., Grill, A., Avouris, P. (2010). 100-GHz transistors from wafer-scale epitaxial graphene. *Science*, 327(5966), 662. <https://doi.org/10.1126/science.1184289>
- Nair, R. R., Blake, P., Grigorenko, A. N., Novoselov, K. S., Booth, T. J., Stauber, T., Peres, N. M. R., Geim, A. K. (2008). Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*, 320(5881), 1308. <https://doi.org/10.1126/science.1156965>
- 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>

- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Katsnelson, M. I., Grigorieva, I. V., Dubonos, S. V., Firsov, A. A.** (2005). Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 438(7065), 197–200. <https://doi.org/10.1038/nature04233>
- Novoselov, K. S., Jiang, Z., Zhang, Y., Morozov, S. V., Stormer, H. L., Zeitler, U., Maan, J. C., Boebinger, G. S., Kim, P., Geim, A. K.** (2007). Room-temperature quantum Hall effect in graphene. *Science*, 315(5817), 1379. <https://doi.org/10.1126/science.1137201>
- Wallace, P. R.** (1947). The band theory of graphite. *Physical Review*, 71(9), 622–634. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.71.622>
- Zhang, Y., Tan, Y. W., Stormer, H. L., & Kim, P.** (2005). Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene. *Nature*, 438(7065), 201–206. <https://doi.org/10.1038/nature04235>
-

AGRADECIMIENTOS

A. R. agradece apoyo a los proyectos FORDECYT-PRONACES/61533/2020 y CIC-UMSNH.