

El grafeno: entre serendipia, cinta adhesiva y emigrantes

Miguel Ángel Méndez-Rojas y Alan Enrique Enciso Barros¹

ABSTRACT (Graphene: in between serendipity, Scotch-tape and immigrants)

Graphene possesses surprising properties which may open a myriad of novel applications and new technologies to arise from it. The development of methods for its preparation has lead several research groups to study its interesting physical and chemical properties. The story behind how two Russian scientists started working on graphene, how they serendipitously find a way to produce it and how their work created the great expectation that we have today around this material is as interesting as the future perspectives and technological applications that may change the way how electronic devices, flat screen displays, disposable plastic electronics and many other daily technologies are made and used. This is a short story of how Andrey and Kosya won a Nobel Prize in Physics.

KEYWORDS: Nobel Prize, graphene, semiconductor

¿Qué es este material que tanto fascina a la comunidad científica en este momento? El grafeno es uno de esos materiales que, como quimera química, surgió primero en la mente de los físicos y químicos teóricos, quienes lo modelaron y estudiaron en sus computadoras, para concluir que un material con dicha estructura y propiedades sería muy inestable —por la gran cantidad de defectos que tendría que poseer— y que por sus características estructurales no podría existir (Novoselov, 2009), pues espontáneamente se enrollaría para formar un nanotubo u otra estructura tridimensional. Con un grosor de apenas un átomo de carbono (unos 3 Angstroms, aproximadamente), constituye el material más bidimensional que podamos imaginar. Es de hecho un cristal bidimensional, que si bien debería poseer numerosos defectos como dislocaciones, en realidad tiene muy pocos. Aun así, no es un material completamente plano y presenta una rugosidad superficial difícil de explicar (figura 1) (González-Carmona, Hernández-Vozmediano & Guinea, 2010).

Entre sus propiedades únicas e interesantes resaltan su enorme elasticidad y resistencia (puede estirarse hasta un 10%, con lo que si se depositaran átomos metálicos pesados sobre su superficie se deformaría, como ocurre con una sábana soportando una bola de boliche, sin romperse, pues es duro como el diamante), así como su estructura electrónica intermedia entre un semiconductor y un conductor que le permiten conducir electrones a temperatura ambiente más rápido que ningún otro material (González-Carmona, Hernández-Vozmediano & Guinea, 2010). Es un material extraordinario

que permite probar, a un bajo costo, predicciones de la mecánica cuántica relativista (Geim, 2009; 2007; Geim & Novoselov, 2007) que previamente sólo podían evaluarse en aceleradores de partículas o en objetos astrofísicos lejanos (Geim & Kim, 2008) como los hoyos negros.

Varios grupos de investigación alrededor del mundo, en particular el dirigido por Philip Kim en la Universidad de Columbia, buscaban maneras de separar las capas individuales del grafito. En la aproximación de Kim, un cristal de grafito se colocaba en la punta de un microscopio de fuerza atómica (AFM) y con éste se marcaban las caras estructurales de una superficie de silicio (un “nano-lápiz”; Geim & Kim, 2008; Novoselov *et al.*, 2005). De esta manera, podían obtener hojuelas de entre 10 a 20 hojas. Fue el azar (esa *lotería* que premia de formas misteriosas a un investigador) lo que permitió a los físicos Andrey K. Geim y Kosya S. Novoselov descubrir que con cinta adhesiva simple podían remover por fuerza bruta las capas superficiales de una pieza de grafito y luego de repetir varias veces el procedimiento, podían obtener fragmentos más y más delgados (Geim & Kim, 2008; Novoselov, Geim *et al.*, 2004) (figura 2). Esta metodología era empleada en el laboratorio de Andrey de manera rutinaria para limpiar la superficie de cristales de grafito, y fue iniciativa de Kosya el re-

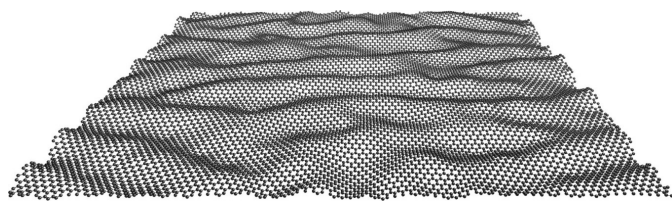


Figura 1. Representación conceptual de una hoja de grafeno. (tomado de <http://chaos.utexas.edu/people/faculty/michael-p-marder/rippling-of-graphene>)

¹ Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad de las Américas Puebla, San Andrés Cholula, Puebla 728280, México. Reseña elaborada a solicitud del Director de la revista.



Figura 2. Los co-descubridores del grafeno: Kosya Novoselov, Andrey Geim y una cinta adhesiva.

visar la cinta adhesiva en vez de simplemente tirarla —lo que era la costumbre en el laboratorio. Grande fue su sorpresa al descubrir que adheridas se encontraban fragmentos individuales, de entre 40, 20, 10 capas, hasta las codiciadas de 1 capa: grafeno. El descubrimiento tomó por sorpresa a todo el mundo, y rápidamente la técnica del “Scotch-tape” se popularizó y extendió. Numerosos grupos podían ahora estudiar las exóticas propiedades del grafeno y explorar sus potenciales aplicaciones en el desarrollo de nuevos transistores que podrán sustituir al silicio en las computadoras futuras, nuevos materiales para la construcción de pantallas planas transparentes, paneles luminosos, celdas solares y múltiples usos más.

La mañana del 5 de octubre de 2010 fue muy especial para Andrey y Kosya. Aun cuando corrían apuestas entre científicos sobre qué campo recibiría el Premio Nobel en Física (el grafeno se encontraba en la lista junto a los nanotubos de carbono, los láseres LED, las propiedades cuánticas anómalas, los metamateriales de índice negativo, la teoría del caos, los cristales fotónicos, los planetas extrasolares y el quark top), como cada año, nadie tenía certeza sobre quién sería galardonado. Andrey durmió profundamente la noche anterior al anuncio, pues nunca pasó por su mente que recibiría, al igual que Kosya, la inesperada llamada desde Estocolmo. Sin embargo, este reconocimiento no ha cambiado mucho las cosas en sus laboratorios de investigación. Kosya y Andrey son ahora colegas en la Universidad de Manchester y planean continuar siéndolo, así como no interrumpir su rutina de trabajo diario por el simple hecho de haber obtenido este premio.

Andrey en particular sabe que la fama es un arma de dos

filos. En el año 2000 recibió, junto a su colega Sir Michael Berry de la Universidad de Bristol, un premio Ig Nobel en Física por haber hecho levitar una rana en un campo magnético intenso (básicamente, quería hacer una demostración espectacular de los principios del diamagnetismo). Ya que los premios Ig Nobel se otorgan por la revista *Annals of Improbable Research* (AIR) a investigaciones irrelevantes y controversiales, el estigma de dicho premio al parecer se ha borrado ahora con su premio más reciente. A la fecha es el único investigador que puede decir que ha recibido ambos premios. En su estilo de trabajo, siempre ha explorado nuevas áreas continuamente. Tiene la costumbre de cambiar de tema de investigación cada cinco años, aunque para el grafeno hará una excepción: no quiere perder la oportunidad de continuar siendo un pionero en un área que es tan caliente que prácticamente cada semana hay nuevos e interesantes descubrimientos.

¿Qué futuras sorpresas nos depara el grafeno? Es difícil predecirlo, pero al menos en México existen grupos que han contribuido de manera importante en el tema. Entre 2008 y 2010 el grupo de investigación de los hermanos Mauricio (hoy profesor titular en Penn State University) y Humberto Terrones Maldonado (hoy profesor visitante en Oak Ridge National Laboratory) y de Yadira Vega Cantú (en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, IPICYT), publicaron sus resultados sobre el desarrollo de métodos muy eficientes para la producción de hojas y listones de grafeno a partir de nanotubos de carbono multicapa (MWNTs; Campos-Delgado, *et al.*, 2008; Cano-Marquez *et al.*, 2009; Elias *et al.*, 2010) (figura 3).

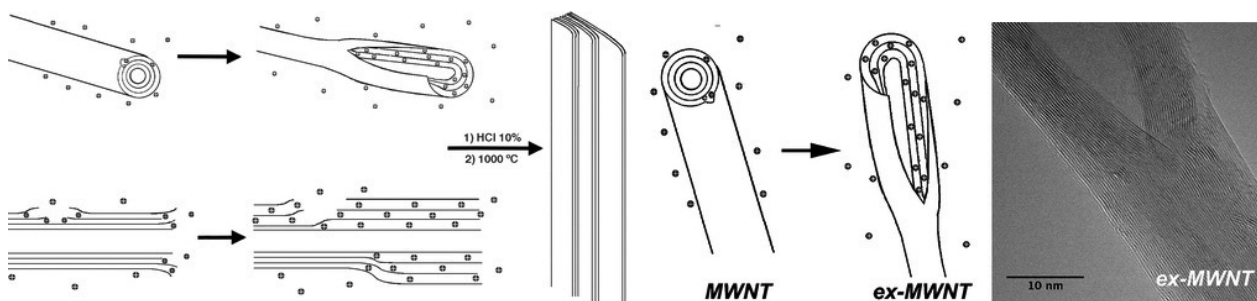


Figura 3. Método para obtención de grafeno por exfoliación.[10]

Recientemente en el Departamento de Física de Rensselaer Polytechnique Institute se desarrolló otra técnica muy simple para la producción de grafeno que consiste básicamente en el tratamiento ultrasónico de grafito en una mezcla de solventes (agua, alcohol y un disolvente orgánico), con lo que obtienen en grandes cantidades hojas separadas de grafito en solución (An *et al.*, aceptado). Otro grupo en Northwestern University ha desarrollado una metodología para producir óxido de grafeno por oxidación directa de grafito y luego transformarlo (con un flash fotográfico) de vuelta en grafeno y así incorporarlo en poliestireno, para producir un material compuesto que puede ser procesado en láminas delgadas, de prácticamente cualquier longitud (Cote *et al.*, 2009). En dicho trabajo de investigación, uno de los desarrolladores fue el mexicano Rodolfo Cruz-Silva, quien realizaba una estancia postdoctoral en dicha institución —hoy es un profesor asociado en Shinshu University, en Japón. Sin duda, el sabor mexicano a la investigación en grafeno tiene mucho potencial, aun cuando varios de sus actores han emigrado al extranjero. Tal vez por eso no nos quede más que desearle más éxitos a Andrey y Kosya, dos investigadores que también salieron de su país en búsqueda de mejores condiciones de vida y trabajo y que hoy son ejemplo de que, bajo las condiciones propicias, grandes resultados pueden ser obtenidos. Enhorabuena.

Como nota final, es importante señalar que una controversia (como siempre ocurre en estos casos) ha surgido derivada de una carta enviada por el físico Walter de Heer (Georgia Institute of Technology) a la Real Academia Sueca de Ciencias, por “no hacer su tarea apropiadamente”, en referencia a no haber investigado adecuadamente los antecedentes sobre investigación en grafeno, en particular por citar artículos publicados por Geim y Novoselov que “no medían capas simples de grafeno, sino sistemas multicapas”. A partir de esa carta, numerosos otros investigadores se han unido a la protesta. Sin duda, la ciencia como toda actividad humana, se disfruta más cuando hay pasiones y controversias entre quienes la realizan. *Errare humanum est.*

Bibliografía

- An, X.; Simmons, T.; Rakesh, S.; Wolfe, Ch.; Lewis, K. M.; Washington, M.; Nayak, S. K.; Talapatra, S.; Kar, S., Stable Aqueous Dispersions of Noncovalently Functionalized Graphene from Graphite and their Multifunctional High-Performance Applications, *Nano Letters*, 2010 (artículo aceptado para publicación). Puede descargarse de la URL <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl903557p>
- Campos-Delgado, J.; Romo-Herrera, J. M.; Jia, X.; Cullens, D. A.; Muramatsu, H.; Kim, Y. A.; Hayashi, T.; Ren, Z.; Smith, D. J.; Okuno, Y.; Ohba, T.; Kanoh, H.; Kaneko, K.; Endo, M.; Terrones, H.; Dresselhaus, M. D.; Terrones, M. Bulk production of a new form of sp^2 carbon: crystalline graphene nanoribbons, *Nano Letters*, 8(9), 2773-2778, 2008. Puede descargarse de la URL <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl801316d>
- Cano-Marquez, A. G.; Rodríguez-Macias, F. J.; Campos-Delgado, J.; Espinosa-González, C. G.; Tristán-López, F.; Ramírez-González, D.; Cullen, D. A.; Smith, D. J.; Terrones, M.; Vega-Cantú, Y. I., Ex-MWNTs: graphene sheets and ribbons produced by lithium intercalation and exfoliation of carbon nanotubes, *Nano Letters*, 9(4), 1527-1533, 2009. Puede descargarse de la URL <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl803585s>
- Cote, L.; Cruz-Silva, R.; Huang, J., Flash Reduction and Patterning of Graphite Oxide and Its Polymer Composite, *Journal of the American Chemical Society*, 131, 11027-11032, 2009. Puede descargarse de la URL <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja902348k>
- Elias, A. L.; Botello-Méndez, A.; Meneses-Rodríguez, D.; González, V. J.; Ramírez-González, D.; Ci, L.; Muñoz-Sandoval, E.; Ajayan, P. M.; Terrones, H.; Terrones, M., Longitudinal cutting of pure and doped carbon nanotubes to form graphene nanoribbons, *Nano Letters*, 10(2), 366-372, 2010. Puede descargarse de la URL <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl901631z>
- Geim, A. K. Graphene: Status and Prospects, *Science*, 324(5934), 1530-1534, 2009. Puede descargarse de la URL <http://www.sciencemag.org/cgi/reprint/324/5934/1530.pdf>
- Geim A. K.; Kim, P., Carbon Wonderland, *Scientific American*, 298, 90-97, 2008. Puede descargarse de la URL [http://www.condmat.physics.manchester.ac.uk/research/graphene/17%20Sci.%20Am.%20298,%2090-97%20\(2008\).pdf](http://www.condmat.physics.manchester.ac.uk/research/graphene/17%20Sci.%20Am.%20298,%2090-97%20(2008).pdf)
- Geim, A. K.; MacDonald, A. H., Graphene: Exploring carbon flatland, *Physics Today*, 60, 35-41, 2007. Puede descargarse de la URL <http://www.condmat.physics.manchester.ac.uk/fullpub/28%20Physics%20Today%2060%2035%2041%20AUG%202007.pdf>
- Geim, A. K.; Novoselov, K. S. The rise of graphene, *Nature Materials*, 6, 183-191, 2007. Puede descargarse de la URL <http://www.nature.com/nmat/journal/v6/n3/pdf/nmat1849.pdf>
- González-Carmona, J.; Hernández-Vozmediano, M. A.; Guinea, F. Electrónica del grafeno, *Investigación y Ciencia*, 408, 42-49, 2010. Puede descargarse de la URL http://www.investigacionyciencia.es/Archivos/09-10_Guinea.pdf
- Novoselov, K. S. Beyond the Wonder Material, *Physics World*, 22(8), 27-30, 2009. Puede descargarse de la URL <http://physicsworldarchive.iop.org/full/pwa-pdf/22/08/phwv22i08a33.pdf>
- Novoselov, K. S.; Jiang, D.; Schedin, F.; Booth, T. J.; Khotkevich, V. V.; Morozov, S. V.; Geim, A. K., Two-dimensional atomic crystals, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 102(30), 10451-10453, 2005. Puede descargarse de la URL <http://www.pnas.org/content/102/30/10451.full.pdf>
- Novoselov, K. S.; Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Jiang, D.; Zhang, Y.; Dubonos, S. V.; Grigorieva, I. V.; Firsov, A. A., Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *Science* 2004, 306, 666-669. Puede descargarse de la URL <http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/sci;306/5696/666>