



El grafeno: propiedades y aplicaciones

Julio 2017



Introducción

El grafeno es un nanomaterial bidimensional, consistente en una sola capa de átomos de carbono. A pesar de ser tan fino y ligero, es el material más fuerte que se conoce en la naturaleza, con una resistencia 200 veces superior al acero estructural con el mismo espesor. Es elástico, prácticamente transparente y posee una alta conductividad térmica y eléctrica. Además de sus propiedades mecánicas, tiene increíbles propiedades electrónicas, químicas, magnéticas y ópticas.

El grafeno promete miles de aplicaciones en sectores muy dispares y se cree que llegará a sustituir a materiales tan importantes como el silicio. El abanico de posibilidades que abre la utilización y comercialización del grafeno es de una amplitud y versatilidad tal que augura una verdadera revolución tecnológica.

Pese a que el grafeno se conoce desde la década de 1930, fue abandonado por considerarlo demasiado inestable. No fue hasta 2004, cuando los doctores Konstantin Novoselov y Andre Geim consiguieron aislarlo a temperatura ambiente por el método de la cinta Scotch. Este descubrimiento les valió el Premio Nobel de Física en 2010.



Qué es el grafeno

El grafeno es un nanomaterial

El grafeno es un nanomaterial, y como otros similares, ha acaparado el interés de la investigación científica de las últimas décadas. *Nanomaterial* es el nombre genérico para referirse a las partículas cuya dimensión es menor o igual a una millonésima de milímetro en una de sus dimensiones.

Los nanomateriales pueden obtenerse a partir de diferentes elementos o compuestos químicos. El grafeno, por ejemplo, es carbono puro, concretamente es una forma alotrópica del carbono, es decir, una forma en la que se presenta el carbono, al igual que otras formas alotrópicas son el grafito o el diamante.

Así pues, el grafeno no es un material novedoso en cuanto a su composición. Pero sí es nuevo y revolucionario respecto a su estructura, tanto por la disposición y ordenación de los átomos de carbono que lo forman, como por poseer el espesor de un solo átomo (monocapa).

Que el grafeno tenga el espesor de un átomo (monocapa) significa que es extremadamente fino (estaríamos hablando de 0.00000000001 metros, o bien, 0.0000001 milímetros), de modo que parece que solo posee las otras dos dimensiones: la longitud y la anchura, puesto que la tercera, la altura, es tan sumamente pequeña que parece no existir. De ahí que se le considere un material bidimensional. El único material bidimensional que es capaz de mantenerse estable hasta con el grosor de un átomo.

Podemos decir que es grafeno si comprende desde una capa de un átomo de espesor hasta 10 de estas capas superpuestas. Si lo observáramos a través de un microscopio, veríamos cómo estos átomos de carbono permanecen ordenados en forma de hexágonos planos, fuertemente enlazados y dispuestos en una superficie uniforme de ligera ondulación, con una apariencia que recuerda a la de un panal de abejas.

Así pues, según las capas que lo conformen, el grafeno puede ser clasificado en tres tipologías: monocapa (1 capa), bicapa (2 capas), pocas capas (de 3 a 4 capas) y multicapa (entre 5 y 10 capas). Aunque sus propiedades están en función de su dimensionalidad, los cuatro tipos presentan un conjunto de propiedades comunes que permiten caracterizarlos como grafeno.



El grafeno es el precursor de muchas otras formas de carbono, es la unidad elemental básica en 2D para construir todos los materiales gráfiticos de las demás dimensiones. Por ejemplo, si las capas de átomos de carbono las envolvemos a modo de forro de un balón, arqueadas en estructuras de cero dimensiones (0D), obtenemos fullerenos; si las enrollamos cilíndricamente en estructuras 1D, darán lugar a los nanotubos; finalmente, si superponemos más de 10 capas tridimensionalmente (3D), obtendremos el grafito.

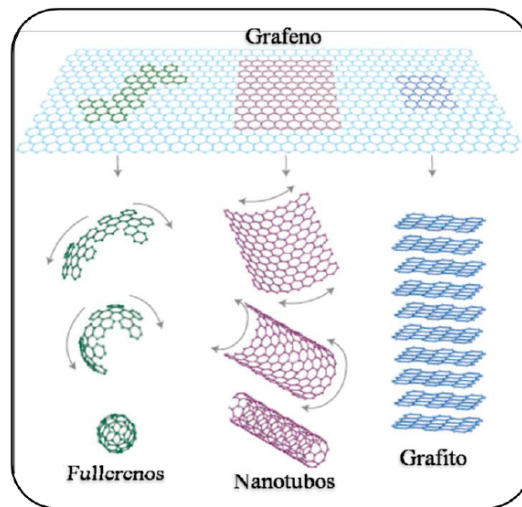


Figura 1. Representación de la lámina de grafeno y de los materiales carbonáceos derivados de él



Propiedades del grafeno

El grafeno por definición posee unas características muy interesantes, algunas absolutamente asombrosas. Además de su extremada delgadez, lo que le hace ser transparente y al mismo tiempo muy flexible, es uno de los materiales más duros y resistentes. El grafeno también es transcendental por las increíbles propiedades térmicas, electrónicas, ópticas y mecánicas que presenta. Estas propiedades junto a la abundancia de carbono en la naturaleza, han hecho al grafeno ganarse el sobrenombre de “material del futuro” o “material de Dios”.

- ES BIDIMENSIONAL

El grafeno se considera un material **bidimensional** porque está compuesto de finísimas capas de un átomo de espesor, con lo que prácticamente solo se aprecian dos de sus dimensiones. Para hacernos una idea más real, estaríamos hablando de que es unas 100.000 veces más **delgado** que el cabello humano.

- ES LIGERO

El grafeno es un material **ultraligero**. Una lámina de grafeno de 1 metro cuadrado pesa solo 0,77 miligramos, lo que, en comparación con el acero (con la misma superficie), supondría un peso 200 veces menor. Sin embargo, tiene una **gran superficie específica** de 2600 m²/g, lo que le confiere cierta capacidad de autoenfriamiento que, a pesar de su resistencia, lo hace extremadamente ligero y flexible. Por poner un ejemplo visual, el grafeno tiene un espesor tal que un solo gramo bastaría para cubrir totalmente un campo de fútbol.

- ES FLEXIBLE

El grafeno es **flexible, elástico, maleable**. Su constante elástica es enorme, tanto que una lámina de grafeno puede estirarse un 10% de su tamaño normal de forma reversible y puede doblarse hasta un 20% sin sufrir daño alguno, al mismo tiempo que puede enrollarse sobre sí misma para crear nanotubos o adoptar cualquier otra forma. Las superficies de los materiales en los que se aplica el grafeno tienen menos posibilidades de quebrarse y por tanto más durabilidad.



- ES DURO Y RESISTENTE

Sin embargo, a pesar de su flexibilidad, el grafeno es un material que supera la **dureza** del diamante y es más de 100 veces más **fuerte y resistente** que el acero estructural con su mismo espesor. Es altamente rígido, con lo que soporta grandes fuerzas sin apenas deformarse. Tiene una resistencia mecánica de 42 N/m (tensión de rotura), mientras que una lámina del acero más resistente y del mismo espesor que el grafeno, tendría aproximadamente una resistencia de 0,40 N/m. Se estima que para atravesar una lámina de grafeno con un objeto afilado sería necesario realizar un peso sobre él de aproximadamente cuatro toneladas.

Para ilustrar mejor estas propiedades mecánicas del grafeno, podríamos poner el ejemplo que utilizaron sus descubridores en el discurso de entrega del premio Nobel. Este material es tan fuerte que una hipotética hamaca casi invisible de un metro cuadrado de superficie hecha con grafeno sería capaz de soportar el peso de un gato sin romperse. La hamaca pesaría menos de 1 miligramo, siguiendo con la analogía, menos que uno de los pelos del bigote del gato.

- ES TRANSPARENTE

En cuanto a propiedades ópticas, el grafeno puro es prácticamente **transparente**, similar al vidrio, debido a su poco espesor. Una monolámina de este material absorbe solamente un ~2,3 % de luz blanca incidente que llega a su superficie. La absorción de luz se incrementa conforme aumenta el número de láminas de grafeno que se superponen (esto es, cuantas más láminas compongan el grafeno, menos transparente es).

- ES CONDUCTOR ELÉCTRICO Y TÉRMICO

El grafeno es el mejor **conductor térmico** que se conoce y también un excelente **conductor eléctrico**.

Su conductividad térmica es de 5,000 W/mK, mayor que la del cobre, el diamante o la plata, lo que le permite disipar el calor y soportar intensas corrientes eléctricas sin calentarse. Por otro lado, el grafeno conduce la electricidad tan bien como el cobre: su conductividad eléctrica es $0,96 \cdot 10^8 (\Omega \cdot m^{-1})$, mientras que la del cobre es de $0,60 \cdot 10^8 (\Omega \cdot m^{-1})$ y la del silicio $4,5 \cdot 10^{-4} (\Omega \cdot m^{-1})$.



- ES HÍBRIDO ENTRE SEMICONDUCTOR Y METAL

Una forma de clasificar los materiales según lo bien que conduzcan la electricidad es en: conductores, semiconductores y aislantes. El grafeno no es ninguna de las tres, sino que comparte características de los conductores y los semiconductores.

A nivel cuántico, debido a su disposición espacial y al tipo de enlace entre los carbonos que lo componen, los electrones se desplazan sobre la superficie del grafeno a una velocidad sin precedentes en ningún otro material, comportándose como partículas sin masa conocidas como fermiones de Dirac (al igual que los fotones y los fermiones), y la relación resultante entre la energía y su momento es lineal.

Se mueven a una velocidad 300 veces menor que la de la luz, pero mayor que la de los electrones de los metales. Comparar la velocidad a la que se mueven los electrones en el grafeno y en el silicio, sería como comparar un coche de Fórmula 1 con una bicicleta. Al aumentar su velocidad y eficiencia, el grafeno se calienta menos (tiene menor *efecto Joule*) y necesita menos energía (es decir, consume menos electricidad) que el silicio para realizar la misma tarea.

Esto permite que en un pequeño trozo de grafeno se puedan realizar experimentos que hasta ahora solo podían hacerse en aceleradores de partículas. Por estas razones, el grafeno no puede clasificarse ni como un semiconductor ni como un metal. Es un **híbrido** entre ambos materiales que posee las mejores propiedades de los dos.

- SOPORTA LA RADIACIÓN IONIZANTE

Estudios recientes también han demostrado que el grafeno tiene una alta reactividad química y que, al incidir la luz sobre él, emite energía (por la promoción de electrones) pero sin llegar a ionizarse (es decir, el átomo no llega a desprenderse del electrón), por lo que es capaz de **soportar la radiación ionizante**. La radiación ionizante tiene aplicación en campos como el sanitario, en el que se utilizan aparatos que emiten estas radiaciones, como en sistemas de radioterapia, etc.

- ES MULTIPLICADOR DE FRECUENCIAS

El grafeno es **multiplicador de frecuencias**. Si se le aplica una señal eléctrica de cierta frecuencia, el grafeno genera otra onda del doble o triple de frecuencia, por lo que permite trabajar a frecuencias



de reloj mucho más altas que las actuales y aumentar así la velocidad y el intercambio de información de los procesadores.

- ES DENSO E IMPERMEABLE

A todas las ventajas mencionadas hasta ahora tenemos que añadirle su condición de **impermeable**. El grafeno es **muy denso**, incluso resistente a la penetración de las moléculas del gas helio, las más pequeñas que existen. Sin embargo, sí **deja pasar el agua**, la cual, encerrada en un recipiente de grafeno, muestra una velocidad de evaporación similar a la que muestra en un recipiente abierto.

Geim y su grupo de científicos observaron que una lámina de óxido de grafeno es impermeable a todo tipo de líquidos, vapores y gases, salvo al agua. Las capas de óxido de grafeno dejan huecos que permiten pasar a las moléculas de agua (el H₂O penetra a través de las membranas de óxido de grafeno diez mil millones de veces más rápido que el helio), pero si otras moléculas tratan de hacer lo mismo se ven frenadas por los capilares del grafeno, que se recubren con las moléculas de agua.

Mediante un experimento comprobaron que el agua se evapora a la misma velocidad en un recipiente sellado con membranas de grafeno que en un recipiente totalmente abierto. Es por ello que otras aplicaciones industriales del grafeno podría estar relacionadas con la separación y filtración de sustancias, la destilación de ciertos líquidos, la producción de biocombustible, la eliminación de tóxicos en el agua o la purificación de ciertos productos químicos, entre otras.

- ES BACTERICIDA

Es un material **bactericida**, capaz de inhibir el crecimiento de microorganismos como bacterias, virus y hongos, pero que, sin embargo, no afecta al ADN humano y, por ser carbono, se ha demostrado que **permite el crecimiento de células**, lo que lo convierte en un sustrato con un potencial muy interesante para la medicina regenerativa o para la industria alimentaria.

- ES BIOCOMPATIBLE

Los estudios *in vivo* que se han realizado sobre la toxicidad del grafeno, todos ellos en poblaciones de ratas por inyección intravenosa e intratraqueal, han revelado que el óxido de grafeno no reporta toxicidad aparente para las células biológicas en concentraciones bajas y medias (0,1 mg y 0,25



mg), mientras que las dosis altas (0,4 mg) mostraron toxicidad crónica, pues aproximadamente 4 de 9 ratones murieron.

Podemos concluir, que el grafeno puede ser dañino para la salud cuando está sin funcionalizar debido a los residuos derivados de su producción. Sin embargo, ya oxidado y funcionalizado, tiene efectos de estrés oxidativo, y es menos viable a medida que sus dosis y su concentración son más altas.

- REACCIONA CON OTRAS SUSTANCIAS

El grafeno es sensible a cualquier molécula que se deposite en su superficie y **puede reaccionar con otras sustancias** para formar composites con diferentes propiedades, lo que dota a este material de gran potencial de desarrollo.

- ES AUTORREPARABLE

Otras características, todavía en investigación y discusión, son la capacidad de autoenfriamiento y la capacidad de autorreparación. Al parecer, si una capa de grafeno pierde algunos átomos de carbono por cualquier motivo, los átomos cercanos al hueco dejado se acercan y cierran dicho hueco. Esta capacidad de autorreparación podría aumentar la longevidad de los materiales fabricados con grafeno, aunque de forma limitada.



Métodos de obtención

De dónde proviene el grafeno

Aunque la comunidad científica ya conocía la existencia del grafeno y se había estudiado teóricamente desde mediados del siglo pasado, su obtención en estado libre solo fue posible desde hace unos años, con el descubrimiento en 2004 de Geim y Novoselov, un acontecimiento que de inmediato centralizó la atención de la investigación.

El grafito puede considerarse el progenitor del grafeno. En 1986, Boehm y sus colaboradores recomendaron el uso de la palabra *grafeno* para nombrar a cada una de las láminas individuales de carbono que componen el grafito. Puede resultar curioso pensar que una única lámina (grafeno) sea más dura y resistente que la superposición de muchas (grafito). Esto es porque, en el grafito, las láminas de carbono están unidas por las fuerzas de Van der Waals (fuerzas atractivas entre moléculas), que son fuerzas mucho más débiles que las uniones covalentes entre los carbonos que conforman una lámina de grafeno.

El grafeno se puede extraer del grafito por simple exfoliación, pero también puede conseguirse a partir de diversas fuentes basadas en el carbono, uno de los materiales más abundantes de la Tierra.

La producción de grafeno depende del método que utilices para sintetizarlo. Cuanto más puro quieras obtener el grafeno, es decir, de mayor calidad, el proceso será más complicado, la cantidad obtenida más pequeña y el coste más caro. Por eso la producción de grafeno siempre ha estado restringida a nivel laboratorio.

- Síntesis por método físico: método de la cinta Scotch.

El método tradicional, llamado *exfoliación micromecánica*, que les valió a los físicos Andre Geim y Kostantin Novoselov para recibir el Premio Nobel en 2010, consiste en obtener grafeno a base de deshojar el grafito con cinta adhesiva. Tras sucesivas pasadas, parte del grafito se va eliminando y se obtienen capas de grafeno de pequeño espesor.



De este modo se consigue grafeno de alta calidad mediante un método sencillo y barato, si bien tiene la desventaja de que es un proceso muy lento y de bajo rendimiento, a la vez que costoso en cuanto a mano de obra y tiempo requerido para obtener una cantidad mínima de grafeno, por lo que no resulta un procedimiento apto para su uso industrial.



Figura 2. Procedimiento físico para la obtención de grafeno, a partir de la delaminación del grafito

- Síntesis por método químico

Como se ha dicho antes, la exfoliación mecánica del grafito es sencilla y de ella se obtiene grafeno de alta calidad, pero no sirve para la producción de grafeno a gran escala. Por ello, se han tenido que desarrollar métodos alternativos de síntesis económicamente viables y que, de igual manera, den lugar a un grafeno de calidad.

Estos métodos de síntesis pueden seguir dos estrategias distintas: estrategia *Top down* (descendentes) y estrategia *Bottom up* (ascendentes).

Con las estrategias *Top down*, el grafeno se obtiene con la exfoliación de materiales de carbono, normalmente grafito, para obtener láminas de grafeno mediante procesos mecánicos y/o químicos. Con las estrategias *Bottom up*, el grafeno se obtiene a partir de los átomos de carbono generados tras la descomposición de hidrocarburos, generalmente a altas temperaturas. Entre las estrategias *Bottom up* destaca la deposición química en fase de vapor (CVD) y el crecimiento epitaxial sobre sustratos.



En el método de descomposición química en fase vapor (CVD) una fuente carbonosa se descompone catalíticamente sobre un sustrato metálico (níquel o cobre) que se calienta a altas temperaturas (800-1000 °C). La superficie metálica, que actúa como catalizador, provoca, tras la descomposición térmica de los hidrocarburos presentes, la disolución de los átomos de carbono generados en el interior del metal. El grafeno se forma sobre la superficie del metal una vez se alcanza la saturación de estos y el conjunto se enfría. Para terminar, hay que separar la lámina del sustrato metálico, lo que se realiza generalmente mediante la disolución del metal en un agente químico.

Con la CVD se obtienen láminas de grafeno de grandes dimensiones y de buena calidad estructural, potencialmente útiles para aplicaciones electrónicas.

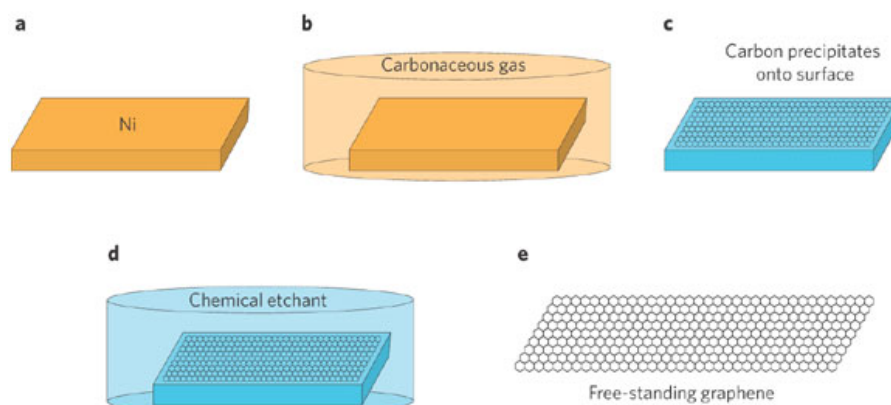


Figura 3. Fases del proceso de CVD para obtener grafeno

Por otra parte, el crecimiento epitaxial es un método por el cual se consigue hacer crecer monocapas aisladas de grafeno sobre un cristal monocristalino de carburo de silicio (SiC), el cual es usado como sustrato. Este método consiste en calentar obleas de carburo de silicio a elevadas temperaturas (>1100°C) y alto vacío. En las condiciones mencionadas se consigue que los átomos de silicio se sublimen (pasen de sólido a gas) consiguiendo el crecimiento epitaxial de grafeno sobre su superficie (los átomos de carbono se reordenan formando grafeno). En comparación con el CVD es un método poco viable por las condiciones de operación y el rendimiento relativamente bajo del método.



Cómo se comercializa

Actualmente, el grafeno se comercializa bajo dos formas: en lámina y en polvo.

- **Grafeno en lámina.** Es de alta calidad y se emplea en campos como la electrónica, la informática o incluso la aeronáutica, donde se requiere obtener un material muy resistente. Su producción es muy costosa.
- **Grafeno en polvo.** Se usa en aquellos ámbitos que no requieren de un material de alta calidad. Su proceso de obtención es más barato y permite una mayor producción del producto, pero teniendo que renunciar a gran parte de sus propiedades, ya que es muy complicado obtener monocapas de grafeno.



Aplicaciones del grafeno

El elevado número de propiedades del grafeno, o de forma más general de los materiales basados en grafeno o derivados de este, hacen que su espectro de aplicaciones sea muy amplio, prácticamente ilimitado, casi supeditados a las barreras de la imaginación humana.

Para poder hacernos una idea de en cuántos campos distintos puede aplicarse el grafeno, basta con echar un vistazo a nuestro alrededor. **Ordenadores, coches, teléfonos móviles y equipos de música** son, por mencionar sólo algunos de ellos, cosas que encontramos frecuentemente en nuestra vida cotidiana en las que el grafeno se podría llegar a aplicar.

Por sus propiedades, el grafeno puede servir como material en la fabricación de **aviones, satélites espaciales o automóviles**, haciéndolos más seguros. También en la **construcción de edificios**, pues los convertiría en más resistentes.

Pero, sobre todo, destacan sus aplicaciones en el campo de la **electrónica**, donde a través de su capacidad para almacenar energía puede dotar a las **baterías** de una mayor duración y un menor tiempo de carga, establecer conexiones más rápidas e incluso contribuir a mejorar el medio ambiente sustituyendo a materiales contaminantes que hoy en día nos vemos obligados a utilizar.

El grafeno es capaz de generar electricidad a través de la energía solar, lo que le convierte en un material muy prometedor en el campo de las **energías limpias**. Si se construyeran con grafeno las placas solares, podrían generar varias veces más energía por hora que las actuales.

No hay que olvidar su relevancia en el ámbito de la **salud**. Su futuro en terrenos como la medicina se presenta realmente prometedor. Las investigaciones han demostrado que, al ser funcionalizado, puede ser usado para transportar fármacos, contribuir para la secuenciación de ADN, utilizarse como biosensores, servir para la creación de prótesis, e incluso se podría aplicar para mejorar el tratamiento de algunas enfermedades y para rastrear el entorno celular para la regeneración de tejidos.



Esta es tan solo una enumeración de algunas aplicaciones que puede tener el grafeno:

- Baterías
- Sensores
- Chips y procesadores
- Ultracondensadores
- Wireless: internet de las cosas
- Impresión 3D
- Robótica
- Láser
- Telecomunicaciones
- Cables de alta velocidad

- Edificios
- Construcciones civiles
- Carreteras
- Pinturas para casa

- Cámaras fotográficas
- Ordenadores
- Smartphones y tablets
- Altavoces, auriculares y micrófonos
- Pantallas táctiles y flexibles: OLED

- Automóviles
- Motos y bicis
- Barcos
- Aviones
- Trenes
- Satélites
- Drones

- Composites
- Defensa: chalecos antibalas, cascos...
- Textiles y calzado



- Termoplásticos
 - Papel y cartón
 - Madera
 - Curtición de pieles
 - Envases para alimentación
 - Material deportivo
 - Cristales inteligentes
 - Productos anticorrosivos
 - Aleaciones con oro, plata, cobre, aluminio...
-
- Telemetría corporal
 - Regeneración de tejidos
 - Conexiones neuronales
 - Transportadores de fármacos
 - Secuenciación de ADN
 - Escáneres corporales
 - Biosensores
 - Odontología
 - Prótesis e implantes
 - Conexiones medulares
 - Biónica
 - Vendajes y apósitos antibacterianos
 - Materiales ortopédicos
 - Audífonos
 - Ropa inteligente con fines médicos
 - Óptica: visión nocturna
-
- Energía solar
 - Energía térmica
 - Energía eólica
 - Energía eléctrica
 - Energía nuclear
 - Limpieza de la radioactividad
 - Desalinización del agua



Referencias

Artículos de interés sobre el grafeno

<http://www.zonabodyboard.com/tag/una-marca-bien-asentada-en-el-mercado-que-ofrece-un-producto-de-calidad-superior-a-precios-muy-asequibles-entre-los-modelos-que-tenemos-ya-disponibles-en-nuestra-tienda-puedes-encontrar-los-promodel-d/>

<http://triplenlace.com/2012/01/13/material-bidimensional-el-grafeno-2/>

<http://www.caffereggio.net/2013/03/10/grafeno-un-material-bidimensional-de-enric-bertran-serra-en-dinero-de-la-vanguardia/>

<http://www.tuexperto.com/2013/02/09/las-caracteristicas-del-grafeno-un-material-revolucionario/>

<http://www.sabermas.umich.mx/archivo/secciones-anteriores/articulos/40-numero-5/80-grafeno-el-material-maravilla.html>

<http://www.diariodeavisos.com/2011/09/el-material-mas-eficiente-del-mundo-es-tambien-el-mas-ecologico/>

<http://francis.naukas.com/2012/01/29/andre-geim-premio-nobel-de-fisica-2010-demuestra-en-science-como-destilar-vodka-utilizando-oxido-de-grafeno/>

http://www.oxidodegrafeno.com/es/noticias/pagina_5/2015/05/02/431/oxido-de-grafeno-para-bioimplantes.php

<http://blog.educastur.es/galileo/2012/03/13/el-oxido-de-grafeno-es-impermeable-a-gases-y-liquidos-pero-no-al-agua/>

<http://www.holamundo.mx/grafeno-el-material-del-futuro/>

<http://www.seas.es/blog/automatizacion/el-grafeno-propiedades-caracteristicas-y-aplicaciones/>

<http://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/conozca-las-primeras-aplicaciones-cotidianas-del-material-milagro-el-grafeno>

http://www.academia.edu/22075125/GRAFENO_Y_LA_BIOMEDICINA



<https://supercurioso.com/que-es-el-grafeno-propiedades-del-grafeno/>

<https://www.infografeno.com/propiedades-del-grafeno>

<https://losgrafenos.wikispaces.com/%C2%BFQu%C3%A9+es+el+grafeno%3F+Estructura+y+propiedades>

<http://grafeno.com/propiedades-del-grafeno/>

<https://rodrigoibarnes.com/2017/03/07/grafeno-el-material-del-futuro/>

<https://curiosoando.com/que-es-el-grafeno>

https://www.researchgate.net/publication/310507561_Posibles_aplicaciones_del_grafeno_como_bactericida

<http://francis.naukas.com/2012/01/24/el-grafeno-es-casi-invisible-para-el-agua-en-humectacion/>