

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DEL GRAFENO EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN (ESTADO DEL ARTE)

KIARA NICOLE GUTIÉRREZ ORIHUELA
<https://orcid.org/0000-0001-5258-6267>

ÓSCAR EDUARDO MORALES FLORES
<https://orcid.org/0000-0003-0137-5675>

RAFAEL CHÁVEZ UGAZ
<https://orcid.org/0000-0002-9450-0158>

GUSTAVO ADOLFO LUNA VICTORIA LEÓN
<https://orcid.org/0000-0001-5065-5433>

Universidad de Lima, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Lima, Perú

Recibido: 12 de marzo del 2021 / Aprobado: 28 de mayo del 2021

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2022.n.5798>

RESUMEN. El presente artículo muestra los resultados de una investigación descriptiva sobre el grafeno y sus posibilidades dentro de la industria de la construcción. Esta industria se encarga de producir, explotar y manipular recursos para construir bienes en las ciudades modernas (edificios, autopistas, veredas, aeropuertos, entre otros), y en este proceso enfrenta grandes desafíos como la contaminación y el uso excesivo de recursos. En tal sentido, esta investigación busca explicar por qué el grafeno es una buena opción para mejorar dicha industria. Como resultado, se concluyó que el grafeno es una solución innovadora en la industria de la construcción para reducir el costo de los materiales, disminuir la contaminación ambiental mediante el método de obtención FJH y aumentar la eficiencia de la composición de la mezcla de cemento.

PALABRAS CLAVE: grafeno / aditivos / materiales de construcción / industria de la construcción / innovaciones tecnológicas

Correos electrónicos en orden de aparición: 20160659@aloe.ulima.edu.pe, 20160923@aloe.ulima.edu.pe, rchavez@ulima.edu.pe, galuna@ulima.edu.pe

SCIENTIFIC RESEARCH ON GRAPHENE IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY (STATE OF THE ART)

ABSTRACT. This paper shows the results of descriptive research on graphene and its possibilities within the construction industry. To get into context, the construction industry is responsible for producing, exploiting and manipulating resources to build goods in modern cities (buildings, highways, sidewalks, airports, among others). Great challenges such as pollution and the excess of the resources used are observed, so this paper aims to explain why graphene is a good option to improve this industry. Among the results, graphene was found to be an innovative solution in the construction industry to reduce the cost of materials, environmental pollution through the FJH procurement method and increase the efficiency of the cement mix composition.

KEYWORDS: graphene / additives / building materials / construction industry / technological innovations

INTRODUCCIÓN

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el planeta está en crisis y la humanidad no está cumpliendo sus compromisos ambientales. En el informe *Hacer las paces con la naturaleza* del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), publicado en febrero del 2021, alerta de la triple crisis ambiental que afecta al planeta: el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la contaminación. La degradación de la Tierra afecta a 3200 millones de personas (el 40 % de la población mundial). Los daños causados por desastres naturales relacionados con el clima supusieron un costo de aproximadamente 155 000 millones de dólares en el mundo solo en el 2018 (PNUMA, 2021). El Perú no es ajeno a esta realidad: en el 2019, se generaron en nuestro país 5 447 333 toneladas de residuos sólidos domiciliarios, lo que equivale a 0,57 kg/hab./día (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2020).

Ese mismo año, el Tribunal de Cuentas de la Unión Europea (TCE) informó que la contaminación en el aire provoca alrededor de 400 000 muertes prematuras en Europa al año (Herrero, 2019). Poco después, la revista *European Heart Journal* publicó un estudio donde se estima que las muertes por polución en el aire fueron 790 000 en el 2015, de las cuales 659 000 ocurrieron dentro de los 28 Estados miembros de la Unión Europea, antes de la salida del Reino Unido (Lelieveld et al., 2019).

En Estados Unidos, se calcula que en todo el país se tuvo un costo de 9100 millones de dólares a causa de muertes prematuras por enfermedades del sistema respiratorio. Asimismo, hubo altos niveles de contaminación por el uso de equipos de construcción antiguos que funcionan con diésel, los cuales emiten altos niveles de dióxido de carbono al ambiente, junto con las partículas de polvo que levantan (Macías, 2006).

Por su parte, Marzouk et al. (2017) realizaron un estudio del impacto ambiental de proyectos de construcción en países en vías de desarrollo. Los principales indicadores: huella de gas doméstico, impacto en la salud humana, potencial de acidificación, agotamiento del ozono e impacto en el esmog, fueron negativos.

Además, la industria de la construcción tiene altos costos de materiales. En el 2020, la ciudad de Querétaro, México, proyectó alzas en los costos finales de las obras en al menos 10 %, debido a que prevalece un constante incremento en los precios de materiales, según el tipo de obra (Estrella, 2020). Asimismo, Pérez (2021) afirma que el costo de vivienda se incrementó en 8,1 % en Tijuana y en promedio en México aumentó en 5,4 % a causa del costo de los materiales. Por su parte, el Gobierno argentino detectó aumentos desmedidos en materiales de construcción:

El costo de los materiales de la construcción, medido por el INDEC, cerró 2020 con un aumento de 64,4 %, casi el doble de la inflación del año, lo cual colocó a la actividad entre las prioridades para el Gobierno al momento de trazar la hoja de ruta de precios y salarios para converger con las metas establecidas en

el Presupuesto 2021. ("Kulfas advirtió que hay aumentos de precios que 'no tienen justificación'", 2021, párr. 5)

Adicionalmente, la actividad manufacturera de Estados Unidos toca su máximo en tres años, pero "las fábricas aún enfrentan costos más altos por materiales y otros insumos mientras persiste la pandemia" ("La actividad manufacturera de EU toca su máximo en 3 años", 2021). Por lo tanto, se observa una oportunidad de mejora en la eficiencia y costo de los materiales utilizados en la industria de la construcción.

Ante esta problemática, se introduce el grafeno (alótopo del carbono) como un material innovador con gran dureza, resistencia, excelente conducción de electricidad, resistencia al calor, transparencia y útil para la ultrafiltración como barrera entre sustancias. Por ende, es una potencial solución que debería satisfacer al mercado de la construcción y encontrar una oportunidad de crecimiento.

Tabla 1

Propiedades del grafeno en comparación con otros materiales

Material	Módulo de Young (TPa)	Resistividad $\Omega \cdot m$ (CN)	Conductividad térmica (W/m·K)	Densidad (g/cm ³)
Grafeno	~ 1,00	1×10^{-8}	5000	$< 18 \times 10^{-5}$
Acero inoxidable	~ 0,20	72×10^{-8}	16,3	7,93
Alúmina	~ 0,392	1011	26-35	3,9
Cobre	0,124	$\sim 1,68 \times 10^{-8}$	29	3,98
Diamante	1	2,7	2000-2500	3,51
Hormigón/cemento	~ 0,05	104	1,8	2,3
Oro	0,082	$2,21 \times 10^{-8}$	314	19,32
Poliestireno	~ 0,03	106	0,13	1,05
Polipropileno	~ 0,0009	1015	0,22	0,9
Vidrio	0,069	1014	1,16	2,7

Nota. La tabla fue realizada tras revisar diferentes fuentes de información. Tales referencias son las siguientes: Alloy Wire International (2021), Rodríguez Villalón (2016) y López-Polín (2016).

Como se observa en la tabla 1, el módulo de Young del grafeno es de ~ 1,00 TPa, su resistividad es $1 \times 10^{-8} \Omega$, su conductividad térmica es 5000 W/m·K y su densidad $< 18 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$. Además, las partículas de grafeno solo tienen un átomo de espesor. Cualquiera creería que es frágil, pero es más resistente y ligero que la fibra de carbono.

Este alótropo del carbono fue descubierto por Andre Geim y Konstantin Novoselov en el 2004. En el 2010, ganaron el Premio Nobel de Física gracias a su experimento en la Universidad de Mánchester, el cual se basaba en utilizar cinta adhesiva y grafito para crear capas de grafeno. Este experimento se replicó en un laboratorio del MIT (Kim et al., 2016). Hasta la fecha del descubrimiento, se creía que el grafeno solo era un material teórico cuya síntesis no era más que una quimera (Prada, 2010). Debido al gran potencial que tiene este material, se encuentra una oportunidad para su industrialización principalmente en la industria de la construcción.

¿El grafeno podrá promover un impacto positivo ambiental, reducir los costos de los materiales en la industria de la construcción e incrementar su eficiencia?

METODOLOGÍA

La metodología para la investigación del grafeno en la industria de la construcción fue no experimental y descriptiva. Se consideraron impactos económicos, tecnológicos y ambientales.

Se tomó como referencia y guía las siguientes preguntas: ¿qué características del grafeno motivaron su uso en la industria de la construcción?, ¿cuáles son las ventajas de la implementación en esta industria? y ¿qué aportes o dificultades se han encontrado en su uso?

Asimismo, después de una revisión de la aplicación del grafeno en diversas industrias, se adoptó un enfoque desde la industria de la construcción. Se consultaron fuentes de Europa, Asia y América entre los años 2006 y 2021. Se trabajó con una base de 176 artículos consultados, de los cuales se seleccionaron 33 luego de aplicar un filtro según la orientación de la investigación por categorías de análisis propuestas e industrias de aplicación del grafeno. De las 33 fuentes citadas, 18 de ellas fueron de la base de datos ProQuest.

Mediante la observación indirecta, se documentó, ordenó y analizó la información hallada por anteriores estudios. Se revisaron investigaciones previas, artículos de revistas científicas, libros, informes de laboratorio, hojas de cálculo y matrices. Finalmente, se realizó la síntesis y presentación del estado del arte de la industrialización del grafeno.

Figura 1
Cantidad de fuentes consultadas por cada base de datos

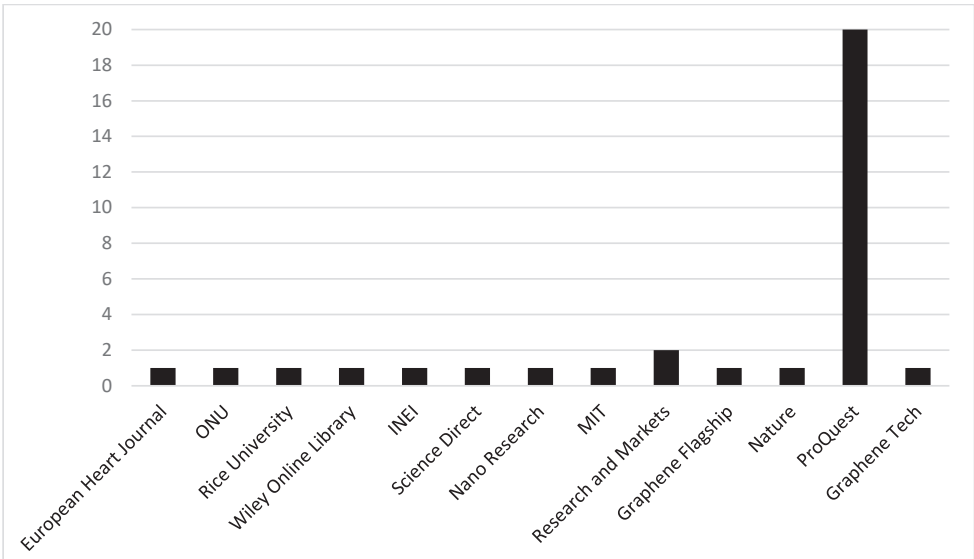


Figura 2
Procedencia de las fuentes de ProQuest



RESULTADOS

Se han establecido técnicas relativamente maduras para la preparación escalable y las aplicaciones industriales del grafeno (Yang et al., 2020), como el método *flash joule heating* (FJH), que consiste en el calentamiento de materiales a base de carbono por 10 ms a una temperatura de 3000 K o 5000 °F. Este método ha demostrado que se puede aprovechar cualquier materia o residuo sólido a base de carbono (incluso residuos plásticos mixtos y neumáticos de goma) para convertirlos en grafeno. El 0,1 % de grafeno *flash* en el cemento utilizado para unir hormigón podría disminuir su impacto ambiental en un tercio. Por lo tanto, este proceso es escalable industrialmente (Williams, 2020).

Además de haber hallado las propiedades usadas en cada industria, logramos observar un enorme potencial de industrialización. El mercado del grafeno espera un crecimiento de 38,5 % en el periodo 2018-2024 (Research and Markets, 2018), y su valor ronda los 100 millones de dólares (Research and Markets, 2019). Por el momento, los países europeos y asiáticos dominan este mercado (Research and Markets, 2019), debido a su intenso avance e investigación en nuevos métodos, patentes y maneras de agregar en el mercado global al grafeno, como señala Graphene Flagship en su página web (<https://graphene-flagship.eu/>). Por otro lado, los métodos propuestos para industrializar son de bajo costo: el FJH genera grafeno sostenible e industrializable (Luong et al., 2020).

En todas las industrias, se busca aprovechar las propiedades del grafeno. Entre ellas, la de ser conductor de electricidad y de calor (Morsin & Yusof, 2017), lo que abre un nuevo mundo de posibilidades en cuanto a estructuras inteligentes y aplicación de tecnología *smart* dentro de las construcciones. En este sentido, el estudio de Dahlan (2018) menciona que los edificios inteligentes necesitan materiales inteligentes para obtener alta compresión y buenas propiedades mecánicas de hormigón a base de cemento Portland para la construcción de edificios.

Se demuestra una mejor eficiencia al añadir grafeno a la mezcla de cemento. El hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC, por sus siglas en inglés) es considerado un material de construcción avanzado en ingeniería civil por sus excelentes propiedades mecánicas y durabilidad. Considerando la escasez de la arena de río, se toman los residuos como materia prima secundaria, mientras que para mejorar su rendimiento se implementó el óxido de grafeno (GO) en la mezcla, lo que redujo la porosidad del UHPC preparado a partir del residuo en un 4,45 % hasta un 11,35 %. La resistencia a la compresión, flexión, tracción dividida y su módulo elástico mejoró entre 8,24 % y 16,83 %, 11,26 % y 26,62 %, 15,63 % y 29,54 %, y 5,84 % y 12,25 %, respectivamente. Adicionalmente, la resistencia del UHPC a la penetración de iones de cloruro y al congelamiento-deshielo

aumentó. Se determinó que la concentración de mezcla óptima de GO en el UHPC era del 0,05 % (Chu et al., 2020).

Por otro lado, en la Universidad de Exeter se desarrolló un concreto innovador producido por la nanoingeniería con propiedades mejoradas. Se incrementa la compresión en un 146 % y 79,5 % en la resistencia flexural. Disminuye la permeabilidad del agua en casi un 400 %, lo cual es ideal para situaciones de inundaciones. Además, mejora el rendimiento eléctrico y térmico (Dimov et al., 2018).

Los científicos de Eden Innovations utilizan *carbon nanotubes* (CNT) con 99,5 % de pureza como aditivo para mejorar la calidad de la pasta de cemento. Los CNT se mezclan con las partículas de cemento hidratante y crean millones de puentes fuertes y flexibles en la matriz de hormigón, la cual demuestra:

Menor permeabilidad, hasta un 54 % de resistividad eléctrica, mayor resistencia a la contracción, un 39 % menos en los resultados de ASTM C157; aumento de las resistencias flexurales, tracción y compresión, 32 %, 46 % y 41 %, respectivamente; más alto en los resultados de ASTM C78, C496 y C39; y mayor resistencia a la abrasión, 59 % mayor en los resultados de ASTM C779. (Marsh, 2017)

XG Concrete™ es un producto mejorado que resulta de la alianza estratégica de XG Sciences, Inc., y CenoStar Corporation. Reduce la absorción de humedad y la propagación de grietas, y aumenta la fuerza para ofrecer hormigón más duradero (*CenoStar and XG Sciences Partner to Deliver Graphene-Enhanced Concrete*, 2019).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Ahora que las posibilidades del grafeno y su aplicación en la industria de la construcción son claras, ¿qué impide al Perú iniciar la investigación y producción? La Unión Europea comenzó en el 2013 una iniciativa de investigación llamada Graphene Flagship, que cuenta con un presupuesto de un billón de euros y busca pasar el grafeno de los laboratorios hacia el mercado. China también ha hecho inversiones fuertes para la investigación y comercialización del grafeno para dominar este mercado, junto con la creación de patentes. El gobierno de Estados Unidos ya invierte en la investigación esencial del grafeno. Incluso Singapur ha invertido mayor per cápita (normalizando el producto bruto interno) en grafeno que cualquier otro país (Critchley, 2018). Otro factor que podemos tomar en cuenta para promover esta inversión es la mejora de las industrias en general.

Tabla 2*Datos de la comercialización de grafeno en Europa*

Producto	Descripción	Presentación	Pureza	Área superficial (m ² /g)	Precio (moneda/ gramo)	Precio (PEN/ gramo)
GP500	Nanoplaqueta de grafeno	Polvo	> 97 %	450 ± 30	6,00 EUR	25,2
GPA	Nanoplaqueta de grafeno	Polvo	> 99 %	350 ± 10	1,02 EUR	4,26
GPL	Nanoplaqueta de grafeno	Polvo	> 97 %	200 ± 20	1,12 EUR	4,70
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno	Gránulos	NA	NA	2,40 USD	8,16
Masterbatch ABS	ABS + grafeno	Gránulos	NA	NA	0,29 USD	1,22

Nota. Conversión hecha el 7 de agosto del 2020, 1 EUR = 4,19 PEN, según los datos de GrapheneTech (s. f.). La tabla 2 muestra que el gramo de grafeno es relativamente barato, lo cual abre la posibilidad de utilizarlo con otros materiales y seguir reduciendo costos de producción. A pesar de que el precio comercial es elevado en comparación con otros materiales, como el cobre o el aluminio, las propiedades que posee lo hacen más cotizado y las proyecciones mundiales de este mercado son millonarias. Tan solo en el 2018 el mercado global de grafeno valía más de 100 millones de dólares (Research and Markets, 2019).

Además, considerando que China posee el 20 % de este mercado, para el periodo 2019-2025 se espera un crecimiento constante de al menos 50 % (Research and Markets, 2019). En el Perú solo existen datos de un proyecto de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) para producir grafeno utilizando residuos de la selva. En comparación con otros países que ya tienen institutos dedicados solo al grafeno, así como más de trescientas industrias de producción de grafeno (como sucede en China), el Perú no puede quedarse sin explotar esta oportunidad. El mineral con mayor exportación y producción en el Perú es el cobre, que genera ingresos de 13 488 millones de dólares aproximadamente (Tiempo Minero, 2019). De estos se deben restar los costos de contaminación que en el 2008 y el 2009 fueron de alrededor de 814,7 millones de dólares y 448,8 millones de dólares, respectivamente (Herrera Catalán & Millones Destéfano, 2011). Al usar el grafeno no solo se lograría eliminar el costo de contaminación casi por completo, sino también reducir la huella de carbono al emplear residuos sólidos como materia prima (Luong et al., 2020).

El grafeno es un material con excelentes propiedades conductivas, térmicas, de resistencia flexural, compresión, tracción y permeabilidad ante el agua. Esto permite su aplicación a la industria de la construcción con el beneficio de la reducción de costos en los procesos de fabricación y el incremento de eficiencia en la mezcla de cemento. El método FJH se considera como el más industrializable y sostenible para el ambiente. Según las fuentes recopiladas, el grafeno no presenta impactos ambientales, ayuda a la reducción de la huella de carbono y el proceso FJH funciona como control de desechos y residuos al reutilizarlos como materia prima. Existe una oportunidad de desarrollo y crecimiento del grafeno como aditivo en la industria de la construcción.

REFERENCIAS

- Adar, F. (2011). Graphene: why the Nobel Prize and why Raman? *Spectroscopy*, 26(2), 16-18, 20-24. http://fresno.ultima.edu.pe/ss_bd00102.nsf/RecursoReferido?OpenForm&id=PROQUEST-41716&url=https://www.proquest.com/trade-journals/graphene-why-nobel-prize-raman/docview/856906579/se-2?accountid=45277
- Alloy Wire International (2021). *Stainless Steel 304*. <https://www.alloywire.es/products/stainless-steel-304/>
- Business Wire. (2014, 1 de mayo). *Research and Markets: The global market for graphene to 2020: Aerospace, automotive, coatings and paints, communications, sensors, solar, oil & lubricants*. <https://www.businesswire.com/news/home/20140501006411/en/Research-and-Markets-The-Global-Market-for-Graphene-to-2020-Aerospace-Automotive-Coatings-And-Paints-Communications-Sensors-Solar-Oil-Lubricants>
- CenoStar and XG Sciences Partner to Deliver Graphene-Enhanced Concrete (2019, 30 de septiembre). Cision PR Newswire. <https://search.proquest.com/docview/2299112447/D00BC3B3789A412EPQ/6?accountid=45277>
- Cheriyian, D., & Choi, J. (2020). A review of research on particulate matter pollution in the construction industry. *ScienceDirect*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120077>
- Chu, H., Zhang, Y., Wang, F., Feng, T., Wang, L., & Wang, D. (2020). Effect of graphene oxide on mechanical properties and durability of ultra-high-performance concrete prepared from recycled sand. *Nanomaterials*, 10(9), 1718. <https://doi.org/10.3390/nano10091718>
- Controlarán los precios de los materiales de construcción. (2021). *El Día*. http://fresno.ultima.edu.pe/ss_bd00102.nsf/RecursoReferido?OpenForm&id=PROQUEST-41716&url=https://www.proquest.com/newspapers/controlarán-los-precios-de-materiales/docview/2497685572/se-2?accountid=45277

- Critchley, L. (2018, 16 de marzo). What's been happening with graphene in the US? *Nano. The Magazine for Small Science*. <https://nano-magazine.com/news/2018/3/16/whats-been-happening-with-graphene-in-the-us>
- Dahlan, A. S. (2018). Smart and functional materials based nanomaterials in construction styles in nano-architecture. *Silicon*, 11(4), 1949-1953. <https://doi.org/10.1007/s12633-018-0015-x>
- Dimov, D., Amit, I., Gorrie, O., Barnes, M. D., Townsend, N. J., Neves, A. I. S., Withers, F., Russo, S., & Craciun, M. F. (2018). Ultrahigh performance nanoengineered graphene-concrete composites for multifunctional applications. *Advanced Functional Materials*, 28(23). <https://doi.org/10.1002/adfm.201705183>
- Estrella, V. (2020, 24 de mayo). Industria de la construcción queretana prevé aumento en costos de producción. *CE Noticias Financieras*. http://fresno.ulima.edu.pe/ss_bd00102.nsf/RecursoReferido?OpenForm&id=PROQUEST-41716&url=https://www.proquest.com/wire-feeds/industria-de-la-construcción-queretana-prevé/docview/2406458031/se-2?accountid=45277
- GrapheneTech. (s. f.). *Shop*. Recuperado el 26 de enero del 2022, de <http://www.graphene-tech.net/products-shop/>
- Herrera Catalán, P., & Millones Destéfano, O. (2011). *¿Cuál es el costo de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos en el Perú? Informe final*. Consorcio de Investigación Económica y Social; Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Economía. [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con3_uibd.nsf/FF88A00731054C670525797A006117B0/\\$FILE/Informe_Final_Costo_Economico_de_la_contaminacion_en_los_recursos_Hidrico.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con3_uibd.nsf/FF88A00731054C670525797A006117B0/$FILE/Informe_Final_Costo_Economico_de_la_contaminacion_en_los_recursos_Hidrico.pdf)
- Herrera Catalán, P., & Millones Destéfano, O. (2012). Aproximando el costo de la contaminación minera sobre los recursos hídricos: metodologías paramétricas y no paramétricas. *Economía*, 35(70), 9-59. <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/economia/article/view/3839/3814>
- Herrero, A. (2019). La contaminación mata el doble de lo que creíamos. *El Mundo*. http://fresno.ulima.edu.pe/ss_bd00102.nsf/RecursoReferido?OpenForm&id=PROQUEST-1716&url=https://www.proquest.com/newspapers/la-contaminación-mata-el-doble-de-lo-que/docview/2190273877/se-2?accountid=45277
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). *Perú. Anuario de estadísticas ambientales 2020*. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1760/libro.pdf
- Kim, J., Kim, S.-G., Comeau, B., & Jones, A. (2016). *Graphene 2.674 Lab 11*. MIT Open Course Ware. https://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-674-micro-nano-engineering-laboratory-spring-2016/lab-notes/MIT2_674S16_LabNote11.pdf

- Kulfas advirtió que hay aumentos de precios que "no tienen justificación". (2021, 5 de marzo). *La Voz del Interior*. http://fresno.ultima.edu.pe/ss_bd00102.nsf/RecursoReferido?OpenForm&id=PROQUEST-41716&url=https://www.proquest.com/newspapers/kulfas-advirtió-que-hay-aumentos-de-precios-no/docview/2497700481/se-2?accountid=45277
- La actividad manufacturera de EU toca su máximo en 3 años. (2021, 1 de marzo). *CE Noticias Financieras*. http://fresno.ultima.edu.pe/ss_bd00102.nsf/RecursoReferido?OpenForm&id=PROQUEST-41716&url=https://www.proquest.com/wire-feeds/la-actividad-manufacturera-de-eu-toca-su-máximo/docview/2495369519/se-2?accountid=45277
- Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Pöschl, U., Fnais, M., Daiber, A., & Münzel, T. (2019). Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *European Heart Journal*, 40(20), 1590-1596. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz135>
- López-Polín, G. (2016). *Propiedades mecánicas de membranas de grafeno: consecuencias de la inducción controlada de defectos* [Tesis doctoral no publicada]. Universidad Autónoma de Madrid.
- Luong, D. X., Bets, K. V., Algozeeb, W. A., Stanford, M. G., Kittrell, C., Chen, W., Salvatierra, R. V., Ren, M., McHugh, E. A., Advincula, P. A., Wang, Z., Bhatt, M., Guo, H., Mancevski, V., Shahsavari, R., Jacobson, B. I., & Tour, J. M. (2020). Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis. *Nature*, 577(7792), 647-651. <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-020-1938-0>
- Macías, J. L. (2006, 10 de diciembre). Construir también contamina... y mata. *La Opinión*. http://fresno.ultima.edu.pe/ss_bd00102.nsf/RecursoReferido?OpenForm&id=PROQUEST-41716&url=https://www.proquest.com/newspapers/construir-también-contamina-y-mata/docview/368534331/se-2?accountid=45277
- Marsh, D. (2017). Graphene rises from nanotech as a positive carbon factor for concrete. *Concrete Products*, 120(8), 4. http://fresno.ultima.edu.pe/ss_bd00102.nsf/RecursoReferido?OpenForm&id=PROQUEST-41716&url=https://www.proquest.com/trade-journals/graphene-rises-nanotech-as-positive-carbon-factor/docview/1933115405/se-2?accountid=45277 <https://news.rice.edu/2020/01/27/rice-lab-turns-trash-into-valuable-graphene-in-a-flash-2/>
- Marzouk, M., Abdelkader, E. M., El-zayat, M., & Aboushady, A. (2017). Assessing environmental impact indicators in road construction projects in developing countries. *Sustainability*, 9(5), 843. <https://doi.org/10.3390/su9050843>
- Method turns trash into graphene. (2020). *NASA Tech Briefs*, 44(6), 70-71. http://fresno.ultima.edu.pe/ss_bd00102.nsf/RecursoReferido?OpenForm&id=PROQUEST-

- 41716&url=https://www.proquest.com/trade-journals/method-turns-trash-into-graphene/docview/2436425219/se-2?accountid=45277
- Morsin, M., & Yusof, Y. (2017). The *ab-initio* study of bulk single layer defected graphene towards graphene device. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7(3), 1444-1451. <http://dx.doi.org/10.11591/ijece.v7i3.pp1444-1451>
- Pérez, A. (2021). Incrementa 8,1 % costo de vivienda en Tijuana. *El Imparcial*. <https://www.elimparcial.com/tijuana/tijuana/Lidera-Tijuana-en-aumento-de-costo-de-vivienda-20210307-0001.html>
- Prada, E. (2010, 6 de agosto). Historia de un descubrimiento. *El País*. http://fresno.ultima.edu.pe/ss_bd00102.nsf/RecursoReferido?OpenForm&id=PROQUEST-41716&url=https://www.proquest.com/newspapers/historia-de-un-descubrimiento/docview/737573501/se-2?accountid=45277
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2021). *Making peace with nature*. <https://www.unep.org/es/resources/making-peace-nature>
- Research and Markets (2018). *Graphene market: global industry analysis, trends, market size, and forecast up to 2024*. https://www.researchandmarkets.com/research/tw9phs/graphene_market?w=12
- Research and Markets (2019). *Global and China graphene industry report, 2019-2025*. <https://www.researchandmarkets.com/reports/4808204/global-and-china-graphene-industry-report-2019#pos-0>
- Rodríguez Villalón, A. (2016). *Grafeno: síntesis, propiedades y aplicaciones biomédicas* [Trabajo de fin de grado, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio Institucional de la UCM. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/50453/>
- Tiempo Minero. (2019, 31 de octubre). *Perú, país minero: ¿sabes cuáles su mineral más exportado?* <https://camiper.com/tiempominero/peru-pais-minero-mineral-exportado/#:~:text=La%20Sociedad%20Nacional%20de%20Miner%C3%ADa,13%2C%20488%20millones%20de%20d%C3%B3lares>
- Torres-Silva, H., & López-Bonilla, J. L. (2011). Aspectos quirales del grafeno / Graphene chiral elements. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 19(1), 67-75. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052011000100008>
- Van den Brink, J. (2010). Graphene: what lies between. *Nature Materials*, 9(4), 291-292. <http://dx.doi.org/10.1038/nmat2733>
- Williams, M. (2020, 27 de enero). *Rice lab turns trash into valuable graphene in a flash*. Rice University. News and Media Relations. <https://news.rice.edu/news/2020/rice-lab-turns-trash-valuable-graphene-flash>

- Yang, L., Chen, W., Yu, Q., & Liu, B. (2020). Mass production of two-dimensional materials beyond graphene and their applications. *Nano Research*, 14, 1583-1597. <https://doi.org/10.1007/s12274-020-2897-3>
- You, X., Yang, J., & Shaoming, D. (2021). Structural and functional applications of 3D-printed graphene-based architectures. *Journal of Materials Science*, 56(15), 9007-9046. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-021-05899-x>