

## Los nanomateriales de carbono: una alternativa prometedora para la remoción de colorantes del agua mediante adsorción

Eduardo E. Pérez-Ramírez <sup>1,3</sup>, Miguel de la Luz-Asunción <sup>3</sup>, Ana Laura Martínez-Hernández <sup>1,2,\*</sup>, Néstor Méndez-Lozano <sup>3</sup> y Carlos Velasco-Santos <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Metalmeccánica, Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro, Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

<sup>2</sup> Laboratorio de Materiales y Nanotecnología, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México campus Querétaro plantel norte, Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

<sup>3</sup> CIIDETEC, Universidad del Valle de México Campus Querétaro, Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

\* Autor de correspondencia: [almh72@gmail.com](mailto:almh72@gmail.com)

### Artículo de divulgación científica

Recibido: 27 de septiembre de 2024

Aceptado: 26 de noviembre de 2024

Publicado: 7 de diciembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.220>

**Resumen:** La descarga de aguas residuales de colorantes procedentes de diferentes industrias constituye un gran peligro para el medio ambiente; su rápida y eficiente remoción es una prioridad importante para los seres vivos. Los colorantes son uno de los más importantes contaminantes del agua debido a su amplio uso en diferentes industrias. Debido a su compleja estructura, son difíciles de degradar, por lo que es necesario buscar alternativas para su adecuada eliminación del agua. Debido a factores como su efectividad, selectividad, fácil operación, entre otros, la adsorción es uno de los métodos más ampliamente utilizados para la eliminación de dichos colorantes. Una de las ventajas de este método en la actualidad, es el empleo de nanomateriales, es decir, materiales a una escala muy pequeña que presentan grandes áreas superficiales, lo que permite tener una mayor oportunidad de remover los colorantes del agua. El óxido de grafeno, los nanotubos de carbono y los puntos cuánticos de grafeno han mostrado un destacado desempeño en la remoción de los colorantes catiónicos y aniónicos presentes en agua y tienen una prometedora aplicación en esta área debido a su naturaleza no tóxica, su alta velocidad de adsorción y su capacidad selectiva. El objetivo del trabajo es dar a conocer el potencial que tienen los nanomateriales de carbono en la remoción de colorantes del agua.

**Palabras clave:** Contaminación del agua, Nanomateriales de carbono; Colorantes; Adsorción, Grafeno

### Introducción

El agua es un recurso esencial para el medio ambiente. La contaminación del agua por diversos contaminantes tóxicos se ha convertido en uno de los problemas graves más importantes a nivel mundial. De un total del 75% del agua subterránea, sólo el 3% del agua es pura, de la cual sólo el 1% está disponible para beber y para uso doméstico. El rápido crecimiento de la industrialización, las actividades antropogénicas, la urbanización no planificada y el inmenso aumento de la población conducen a la liberación de varios contaminantes tóxicos al medio ambiente (Kumar *et al.*, 2019).

Los consumos de agua de las actividades anteriormente mencionadas se muestran en la Tabla 1 y 2.

Tabla 1. Consumos para producción de algunos tipos de industrias

Industria	Rango de consumo ( $m^3/día$ )
Química	5.0 – 25.0
Papel y celulosa	40.0 – 70.0
Bebidas	6.0 – 17.0
Textil	62.0 – 97.0
Siderúrgica	5.0 – 9.0
Alimentos	4.0 – 5.0

Fuente: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>

Tabla 2. Consumos para usos públicos

Instalación	Consumo de agua
Oficinas	20 L/m <sup>2</sup> /día
Locales comerciales	6 L/m <sup>2</sup> /día
Mercados	100 L/local/día
Baños públicos	300 L/baño/regadera/día
Lavanderías	40 L/kilo de ropa seca
Clubes	150 L/asistente/día
Cines y teatros	6 L/asistente/día

Fuente: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>

Entre los diferentes productos nocivos, los colorantes, se consideran como uno de los contaminantes más peligrosos debido a su impacto ambiental, especialmente por su toxicidad para los organismos vivos. Entre ellos se encuentran el azul de metileno, la rodamina B, el naranja de metilo, el rojo Congo, el rojo de metilo y el violeta cristal que son las fuentes más importantes de contaminantes provenientes de diferentes industrias como la textil, cosmética, del cuero, alimentaria, farmacéutica, de pinturas y barnices y de celulosa y papel, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Tipos, ejemplos, aplicaciones y efectos ecotoxicológicos de colorantes

Tipo de colorante	Ejemplos	Aplicaciones	Efectos ecotoxicológicos	Referencia
<b>Ácido</b>	Amarillo ácido 36 Naranja ácido 7 Azul ácido 83 Azul ácido 7	Industria textil, del cuero y farmacéutica; nylon, lana, seda y acrílicos modificados	Vómitos, náuseas, diarrea y efectos cancerígenos y mutagénicos.	Dutta <i>et al.</i> , 2021
<b>Básico</b>	Azul de metileno Rodamina 6G	Industria papelera y poliéster modificado	Cancerígenos (tumores benignos y malignos)	Ruan <i>et al.</i> , 2019
<b>Directo</b>	Negro directo 19 Rojo directo 28 Azul directo 86	Productos para coloración de papel	Tóxico para los animales y plantas acuáticas, cancerígeno, mutagénico y dermatitis.	Shi <i>et al.</i> , 2007
<b>Disperso</b>	Rojo disperso 167 Azul disperso 56 Amarillo disperso 211	Textil, alimentaria, papelera, y farmacéutica.	Dermatitis, irritación de piel y mutagénico.	Ho, 2020
<b>Nitro</b>	Amarillo naftol (II)	Teñir lana	Disminuye la penetración de la luz y la actividad fotosintética, cancerígeno y mutagénico.	Dutta <i>et al.</i> , 2021
<b>Reactivo</b>	Rojo reactivo 120 Rojo reactivo 198	Industria textil, algodón, lana y nylon	Dermatitis, conjuntivitis alérgica	Hunger, 2007
<b>De azufre</b>	Azufre Verde brillante Azufre azul Azufre negro 1 Anhídrido ftálico	Teñido de fibras celulósicas y algodón	Irritación de la piel, estornudos, dolor de ojos y cancerígeno.	Dutta <i>et al.</i> , 2021
<b>Azo</b>	Rodamina B Rojo ácido 18 Rojo ácido 88 rojo de metilo naranja de metilo	Industria textil, papelera, cuero, cosméticos, productos farmacéuticos y alimenticios.	Recalcitrante y cancerígeno en ambiente natural.	Trukawka <i>et al.</i> , 2019

Debido a la elevada concentración de contaminantes tóxicos, existe una necesidad urgente de desarrollar procesos, económicamente viables y respetuosos con el medio ambiente para eliminarlos del agua y salvaguardar la salud de las poblaciones afectadas. La descarga de estos colorantes de desecho industrial sin un previo tratamiento pone en riesgo la salud de los seres humanos, flora, vida acuática y fuentes de agua, entre otros. La Figura 1 muestra una idea sobre cuáles son los principales seres vivos perjudicados por la presencia de agua contaminada por los colorantes. La descarga de estos contaminantes en la hidrósfera representa una amenaza significativa para el medio ambiente, incluso a concentraciones muy bajas reduce la penetración de la luz solar en los ecosistemas acuáticos. En la Tabla 3 se muestran algunos de los efectos nocivos que producen algunos colorantes en los seres vivos. Se estima que cada año, los

efluentes industriales descargan 280,000 toneladas de colorantes textiles a nivel mundial (Ayati *et al.*, 2026), lo cual representa uno de los mayores impactos negativos en la contaminación del medio ambiente.

Los colorantes están formados por estructuras moleculares muy difíciles de degradar. China e India, en la región Asia-Pacífico, son los principales países productores y exportadores de colorantes a nivel mundial. Las principales aplicaciones de estos colorantes son en la industria textil, construcción, automotriz, colorantes para impresión, papelería y cuidado personal. Diversos estudios han documentado que anualmente se conocen más de 100,000 colorantes disponibles comercialmente (Ho, 2020).

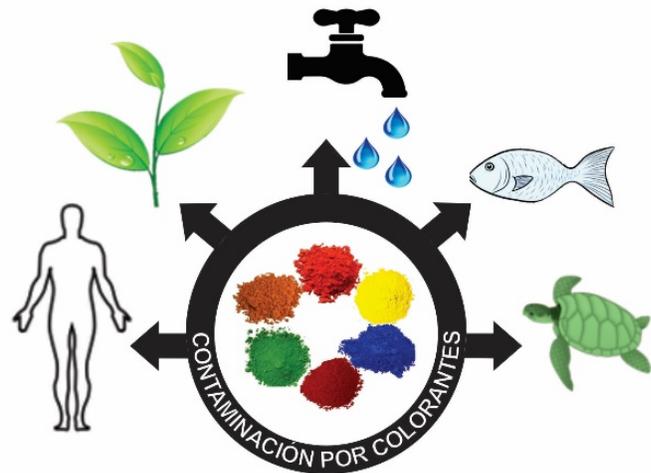


Figura 1. Contaminación por colorantes al ser humano y al medio ambiente. Fuente: Elaboración propia.

### La nanotecnología y los Nanomateriales de carbono

La nanotecnología es considerada una rama de la ciencia y la ingeniería que se especializa en el diseño, manipulación y aplicación de los materiales a una escala nanométrica, es decir, se enfoca en trabajar con materiales a escalas tan pequeñas, invisibles al ojo humano (Mahmoud *et al.*, 2019). Los átomos y moléculas en esta escala se comportan de una manera diferente en comparación con sus contrapartes a una escala micro o macro, mostrando propiedades químicas, físicas y biológicas que son únicas. Una de las principales razones de este diferente comportamiento es el área superficial que presentan estos materiales (Hanumant & Manoj, 2022). Al ser materiales muy pequeños, la suma del espacio que cubre la superficie de una partícula, es mayor que la de una partícula de mucho mayor tamaño, propiciando una diferente interacción con otros materiales. La nanotecnología ha revolucionado diversos sectores como la medicina, en donde se emplean nanopartículas y biosensores para el diagnóstico de cáncer, la producción de energía a través de celdas solares nanoestructuradas y la electrónica, reduciendo el tamaño de diversos dispositivos. Además de lo anterior, la nanotecnología también promete buenos resultados en el área medio ambiental.

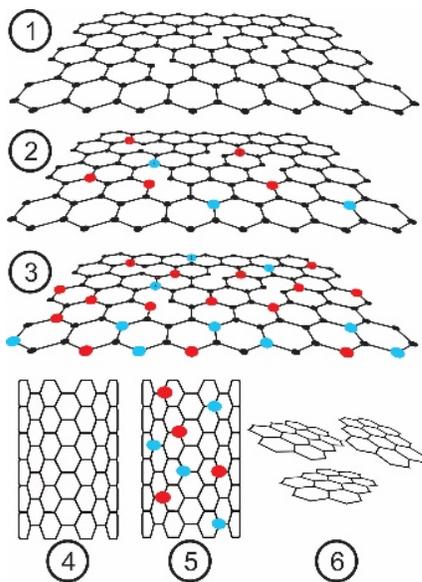


Figura 2. Nanomateriales de carbono: grafeno (1), óxido de grafeno reducido (2), óxido de grafeno (3), nanotubos de carbono (4), nanotubos de carbono oxidados (5) y puntos cuánticos de grafeno (6). Fuente: Elaboración propia.

Un material es considerado nanomaterial cuando al menos una de sus dimensiones se encuentra en la escala nanométrica, es decir, entre 1 y 100 nanómetros. La dimensión de un material es un parámetro muy relevante debido a que está asociada a la forma de los materiales y su área superficial, es decir, el área disponible para la interacción de los nanomateriales con otras sustancias. De acuerdo a sus dimensiones y al confinamiento de los electrones, los nanomateriales se clasifican en 0D, 1D y 2D. Los nanomateriales 0D tienen todas sus dimensiones en escala nanométrica y sus electrones se encuentran confinados (con poco movimiento) en todas ellas. A esta dimensión se le asocia regularmente con las partículas esféricas. Los nanomateriales 1D tienen 2 dimensiones en escala nano, donde se encuentran confinados los electrones y estos solo pueden moverse libremente en una dimensión, por ejemplo, en un nanotubo o un hilo a escala muy pequeña, mientras que los nanomateriales 2D tienen 1 sola dimensión en escala nano, donde sus electrones se encuentran confinados, moviéndose libremente en un plano.

Debido a sus a su versatilidad y a sus interesantes propiedades, los nanomateriales de carbono han ganado mucho auge para su uso en diversas aplicaciones científicas, tecnológicas e industriales. Dentro de esta clase de materiales se incluyen los nanotubos de carbono (1D), el grafeno y sus variantes como el óxido de grafeno y el óxido de grafeno reducido (2D) y los puntos cuánticos de óxido de grafeno (0D). Todos estos nanomateriales se caracterizan por tener una estructura formada por átomos de carbono que se encuentran organizados en una red hexagonal, como la de un panal de abejas. En los nanotubos de carbono, esta conformación se encuentra estructurada en forma cilíndrica, mientras que, en el grafeno, óxido de grafeno y los puntos cuánticos de grafeno, dicha conformación se encuentra en un plano (de la Luz-Asunción *et al.*, 2019). En la Figura 2 se muestran las estructuras de carbono antes mencionadas.

Todos estos nanomateriales tienen la capacidad de funcionalizarse, modificando así sus características superficiales y adaptándose a las necesidades para las que se les requiera. Además de su empleo en las áreas de electrónica, óptica, medicina, energía, materiales compuestos, entre otras, estos nanomateriales tienen un prometedor uso en la remediación de los problemas medioambientales.

*Adsorción: una alternativa prometedora para la remediación de la limpieza del agua.*

Ante la problemática de la contaminación del agua que atraviesa el mundo, diferentes tecnologías como la fotocatalisis, la ozonización, el intercambio iónico, floculación y la electrocoagulación, han sido propuestas para combatir dicho problema. Los colorantes presentes en el agua causan diferentes problemas tanto en el ambiente como en los seres vivos, por lo que es necesario combatirlos.

En el ámbito de la remediación del agua, el proceso de adsorción consiste en la transferencia de las moléculas contaminantes del agua (adsorbato) hacia la superficie de un sólido, denominado adsorbente. El adsorbente actúa como un imán que atrae las impurezas del agua a su superficie. Posteriormente, el adsorbente es retirado del agua, llevando con él las partículas no deseadas. El adsorbente puede ser regenerado, removiendo las partículas de su superficie para volver a ser empleado como adsorbente en un nuevo ciclo de adsorción, es decir, funciona como un imán limpio que recupera su fuerza para atraer nuevas impurezas. La Figura 3 muestra un esquema del proceso de remoción de un colorante azul empleando algunos nanomateriales de carbono, indicando como pierde el color la solución debido a la captura de las moléculas por parte del adsorbente. En la parte derecha de dicho esquema se observan las posibles interacciones que existen entre el adsorbato y el adsorbente, bajo las cuales se da el proceso de adsorción. Para que se pueda realizar el proceso de adsorción, es necesario buscar un material que tenga las características necesarias para fungir como adsorbente. Algunas de estas características son área superficial, porosidad, capacidad de adsorción, velocidad de adsorción, sus grupos funcionales superficiales, etc.

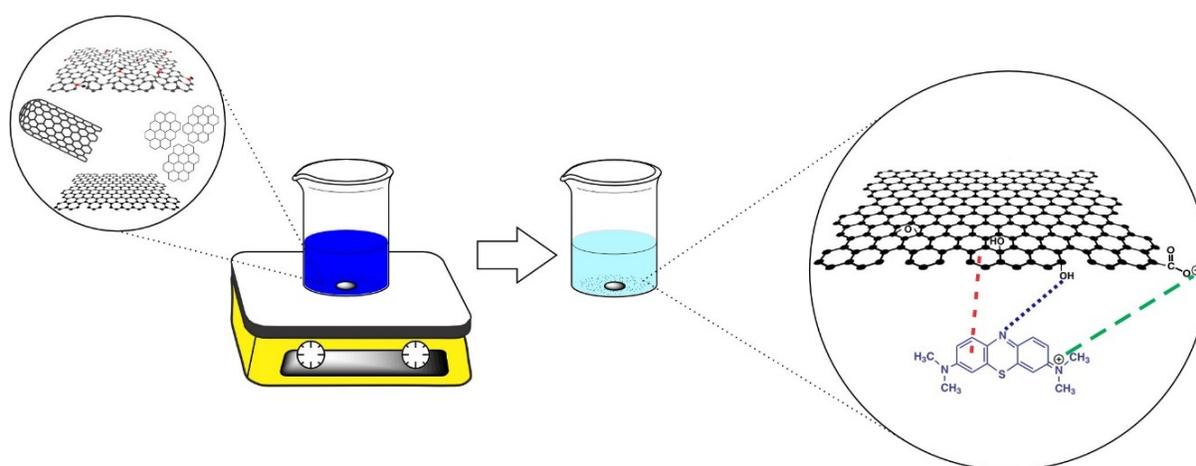


Figura 3. Esquema del proceso de adsorción de un colorante azul sobre nanomateriales de carbono y las posibles interacciones entre éstos.

El proceso de adsorción es considerado uno de los métodos más empleados y efectivos para la eliminación de los colorantes del agua. Lo anterior es principalmente debido a varios factores dentro de los que destacan su efectividad y simplicidad, fácil operación, bajo costo, además de su diseño simple (Pérez-Ramírez *et al.*, 2020). Los adsorbentes

usados en este proceso funcionan como filtros que capturan las moléculas de los colorantes, devolviendo al agua su esencia transparente.

#### *Los nanomateriales de carbono como potenciales aliados para la eliminación de los colorantes del agua*

Debido a sus características superficiales, a su tamaño tan pequeño y a su estructura en capas (como si fueran las hojas de un cuaderno), entre otras cosas, los nanomateriales de carbono son materiales con un importante potencial para su desempeño como adsorbentes para ser empleados en la remoción de colorantes del agua. Diversos estudios han mostrado que estos nanomateriales tienen un futuro prometedor en la eliminación de colorantes aniónicos y catiónicos presentes en el agua (Pérez-Ramírez *et al.*, 2021; de la Luz-Asunción *et al.*, 2020, Pérez-Ramírez *et al.*, 2019).

Los nanotubos de carbono tanto de pared simple como de pared múltiple, han mostrado afinidad por los colorantes catiónicos y aniónicos, aún incluso sin ser funcionalizados, es decir, sin añadir otras moléculas en su superficie, lo cual se debe en gran parte a su estructura cilíndrica y hueca que permiten un gran número de interacciones con las moléculas de los colorantes. Se podría decir que los nanotubos de carbono son como pequeños rollos de malla a escala nanométrica. La forma más común en las que los nanotubos de carbono interactúan con los colorantes es a través de las interacciones  $\pi$ - $\pi$ , que se dan entre su estructura bencénica y los anillos aromáticos que conforman la estructura de los colorantes. Estas interacciones pueden asemejar a lo que pasa cuando dos imanes se acercan atraídos por sus campos magnéticos, creando un vínculo entre sus estructuras.

Entre los materiales denominados como “grafénicos”, por tener una estructura como la del grafeno (laminar), pero con algunas variantes, el óxido de grafeno es el material que ha mostrado un mejor desempeño en la remoción de colorantes catiónicos y aniónicos presentes en el agua. El óxido de grafeno es un nanomaterial que contiene diversos grupos oxigenados superficiales, que le conceden la ventaja de dispersarse de una forma homogénea en el agua y que, además, le permiten interactuar con las estructuras de los colorantes no solo mediante las interacciones  $\pi$ - $\pi$ , sino también a través de interacciones electrostáticas o mediante puentes de hidrógeno.

Por otro lado, los puntos cuánticos de óxido de grafeno han generado buenos resultados en la remoción de los colorantes catiónicos y aniónicos contenidos en el agua. Este nanomaterial tiene un menor contenido de grupos oxigenados respecto al óxido de grafeno, que es el material del cual se derivan. Aún con esa importante diferencia de grupos oxigenados superficiales, debido a su área superficial, suele tener buen impacto en la remoción de los colorantes del agua. La Tabla 4 resume las características y resultados de algunas investigaciones donde han sido empleados diferentes nanomateriales de carbono para la remoción de diversos colorantes presentes en el agua.

Tabla 4. Características y resultados de la adsorción de diversos colorantes sobre nanomateriales de carbono.

Adsorbente	Colorante	Conc. inicial	% Remoción	Parámetros clave	Referencia
Puntos cuánticos de grafeno	Rojo Reactivo 2	30 mg/L	85	pH = 2, alta área superficial.	de la Luz-Asunción <i>et al.</i> , 2020
Nanotubos de carbono prístinos multipared	Rojo Reactivo 2	30 mg/L	100	pH = Neutro, dimensionalidad, morfología, alta velocidad de adsorción.	Pérez-Ramírez <i>et al.</i> , 2019
Óxido de grafeno	Azul de metileno	30 mg/L	100	pH = Neutro, grupos funcionales oxigenados, alta velocidad de adsorción.	Pérez-Ramírez <i>et al.</i> , 2019
Nanotubos de carbono prístinos multipared	Violeta Cristal 2B	10 mg/L	97	pH = Neutro, alta área superficial.	Shabaan <i>et al.</i> , 2020
Nanotubos de carbono prístinos multipared	Rojo Reactivo M-2BE	350 mg/L	95-96	pH = 2-3, alta área superficial	Machado <i>et al.</i> , 2011
Óxido de grafeno	Rodamina B	10 mg/L	88	pH = Neutro, grupos oxigenados superficiales	Molla <i>et al.</i> , 2018

Los factores que suelen tener un mayor impacto en la remoción de los colorantes del agua con los nanomateriales de carbono son: la dimensionalidad del nanomaterial (0D, 1D y 2D), los grupos oxigenados superficiales, el área superficial y el pH. Este último factor es fundamental en el proceso de adsorción debido a que define la carga superficial del adsorbente y con ello puede generar una mayor atracción con la carga del colorante catiónico o aniónico. En la Figura 4 se pueden observar las diferentes estructuras de carbono mencionadas anteriormente y los mecanismos de interacción bajo los que se da la interacción con los colorantes.

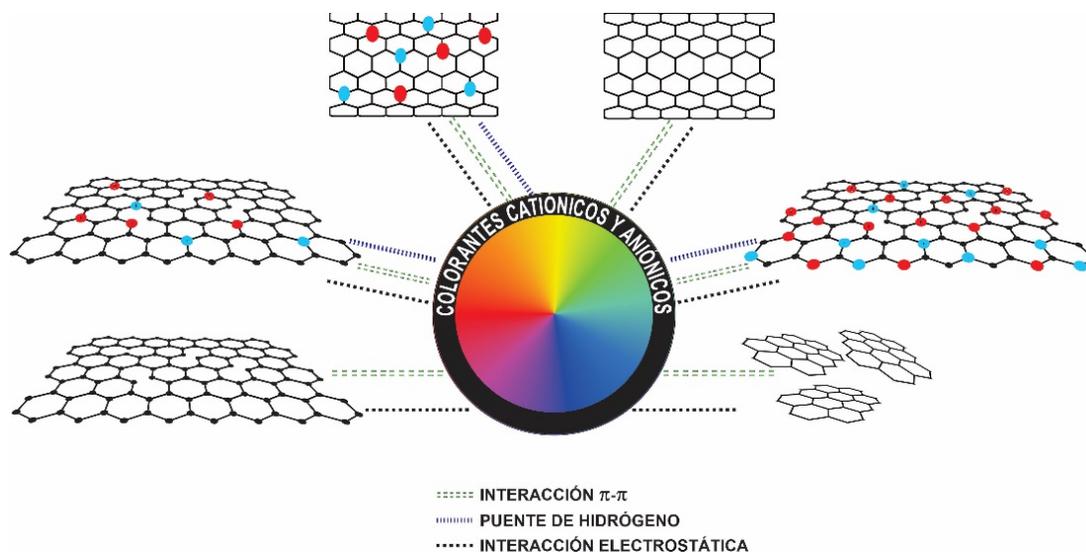


Figura 4. Mecanismos de interacción propuestos entre colorantes catiónicos y aniónicos y nanomateriales de carbono.

Fuente: Elaboración propia

Dos características que han destacado en los nanomateriales de carbono cuando han sido empleados en la eliminación de colorantes del agua, es su rápida velocidad de adsorción y su alta capacidad de adsorción, requiriendo así cortos tiempos de contacto con la muestra contaminada y removiendo una gran cantidad de moléculas contaminantes. Hasta ahora, una de las limitantes del uso de los nanomateriales en el área de la remoción de contaminantes mediante adsorción es la baja producción en masa que existe de estos materiales. Ante esto, se están realizando esfuerzos para obtener nanomateriales a una mayor escala, como es el caso de las nanoplaquetas de grafeno obtenidas a través de un proceso verde (Pérez-Ramírez *et al.*, 2022).

Con la finalidad de hacer más fácil y eficiente la recuperación del adsorbente después del proceso de adsorción, diferentes nanocompuestos conteniendo nanomateriales de carbono han sido probados para la remoción de los colorantes con muy buenos resultados (Carmalin Sophia *et al.*, 2019).

## Conclusiones

El suministro de agua potable, que se utiliza básicamente para fines domésticos y de consumo, está disminuyendo día a día, por lo que es imperativo tomar medidas y acciones para el tratamiento de las descargas de aguas residuales antes de verterlos a los mantos acuíferos. Por sus características ya mencionadas, el proceso de adsorción es una de las mejores alternativas para el control de la contaminación del agua por colorantes. Los resultados obtenidos con los nanomateriales de carbono como adsorbentes de los colorantes contenidos en el agua sugieren que éstos tienen un gran potencial para su aplicación en la limpieza del agua. Debido a su gran área superficial, versatilidad en dimensión, posibilidad de modificar y por ende funcionalizar sus superficies, estos materiales prometen poder ser incorporados en camas de filtración, filtros porosos o membranas dependiendo del proceso utilizado para procesos de remoción de colorantes, algo que es importante resaltar es la pequeña cantidad que se puede utilizar de este tipo de materiales en los procesos de adsorción; en algunos casos existen ya de manera comercial a precios rentables y aún se siguen generando nuevos procesos sustentables para su producción en gran escala (Pérez-Ramírez *et al.*, 2022) que permitan su incorporación definitiva de varios de ellos en el cuidado del medio ambiente, de tal manera que a mediano plazo puedan aplicarse incluso en filtros de purificación de agua caseros accesibles a la población en general.

## Bibliografía

- Ayati, A., Shahrak, M.N., Tanhaei, B., Sillanpää, M. (2016). Emerging adsorptive removal of azo dye by metal–organic frameworks. *Chemosphere*, 160, 30-44. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.06.065>.
- Biblioteca Digital de MAPAS (2024) Guía para el control de descargas a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>.
- Carmalin Sophia, A., Arfin, T., Lima, & E.C. (2019). Recent Developments in Adsorption of Dyes Using Graphene Based Nanomaterials. In: Naushad, M. (Ed.). *A New Generation Material Graphene: Applications in Water Technology*, Springer, Cham, 439-471, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-75484-0\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-75484-0_18).
- de la Luz-Asunción, M., Castaño, V., Pérez-Ramírez, E.E., Mendieta-Sánchez, V. Martínez- Hernández, A.L., & Velasco-Santos, C. (2019). Nonlinear modeling of kinetic and equilibrium data for the adsorption of hexavalent chromium by carbon nanomaterials: Dimension and functionalization. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(4), 912-19. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.08.024>.
- de la Luz-Asunción, M., Pérez-Ramírez, E.E., Martínez-Hernández, A. L., García-Casillas, P. E., Luna-Bárceñas, J. G., & Velasco-Santos, C. (2020) Adsorption and kinetic study of Reactive Red 2 dye onto graphene oxides and graphene quantum dots. *Diamond and Related Materials*, 109, 108002. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108002>.
- Dutta, S., Gupta, B., Srivastava, S. K., & Gupta, A. K. (2021). Recent advances on the removal of dyes from wastewater using various adsorbents: A critical review. *Materials Advances*, 2(14), 4497-4531. <https://doi.org/10.1039/D1MA00354B>.
- Hanumant, B. K., & Manoj B. G. (2022). Introduction to surface-modified nanomaterials. *Surface Modified Nanomaterials for Applications in Catalysis*. 17-29. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823386-3.02001-8>.
- Hunger, K. (Ed.). (2007). *Industrial dyes: chemistry, properties, applications*. John Wiley & Sons.
- Ho, S. (2020). Removal of dyes from wastewater by adsorption onto activated carbon: Mini review. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8(5), 120-131. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.85008>.
- Kumar, P. S., Joshiba, G. J., Femina, C. C., Varshini, P., Priyadharshini, S., Karthick, M. A., & Jothirani, R. (2019). A critical review on recent developments in the low-cost adsorption of dyes from wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 172, 395-416. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24613>.
- Machado, F.M., Bergmann, C.P., Fernandes, T.H.M., Lima, E.C., Royer, B., Calvete, T., & Fagan, S.B. (2011). Adsorption of Reactive Red M-2BE dye from water solutions by multi-walled carbon nanotubes and activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 192, 1122-1131. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.06.020>.
- Mahmoud, N., Mohammad, S., Mohaddeseh, S., & Zahra, I. (2019). An Introduction to Nanotechnology, in: *An Introduction to Green Nanotechnology*. Interface Science and Technology, 28, 2019, 1-27. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813586-0.00001-8>.
- Molla, A., Li, Y., Mandal, M., Kang, S. G., Hur, S.H., & Chung, J. S. (2019). Selective Adsorption of Organic Dyes on Graphene Oxide: Theoretical and Experimental Analysis. *Applied Surface Science*, 464, 170-177. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.09.056>.
- Pérez-Ramírez, E.E., de la Luz-Asunción, M., Martínez-Hernández, A. L., García-Casillas, P. E., Luna-Bárceñas, J. G., & Velasco-Santos, C. (2021) High adsorption of methylene blue from water onto graphenic materials: Effect of degree of graphitization and analysis of kinetic models. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 40(4), e13618. <https://doi.org/10.1002/ep.13618>.
- Pérez-Ramírez, E.E., de la Luz-Asunción, M., Martínez-Hernández, A. L., de la Rosa- Álvarez, G., Fernández-Tavizón, S., Salas, P., & Velasco-Santos, C. (2019). One- and two-dimensional carbon nanomaterials as adsorbents of cationic and anionic dyes from aqueous solutions. *Carbon Letters*, 29(2), 155–166. <https://doi.org/10.1007/s42823-019-00029-9>.
- Pérez-Ramírez, E. E., Ramos-Galicia, L., de la Luz-Asunción, M., Saucedo-Rivalcoba, V., Martínez-Hernández, A. L., Rubio-Rosas, E., & Velasco-Santos, C. (2022). A Green and Easy Large-Scale Method for Obtaining Graphene Nanoplatelets by Steam Explosion and Ultrasonic Exfoliation. *Chemistry Select*, 7, e202202425. <https://doi.org/10.1002/slct.202202425>.
- Ruan, W., Hu, J., Qi, J., Hou, Y., Zhou, C., & Wei, X. (2019). Removal of dyes from wastewater by nanomaterials: a review. *Adv. Mater. Lett*, 10(1), 9-20. <https://doi.org/10.5185/amlett.2019.2148>.
- Shabaan, O. A., Jahin, H. S., & Mohamed, G. G. (2020). Removal of anionic and cationic dyes from wastewater by adsorption using multiwall carbon nanotubes. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(2), 4797-4810. <https://doi.org/10.1016/j.arabic.2020.01.010>.
- Shi, B., Li, G., Wang, D., Feng, C., & Tang, H. (2007). Removal of direct dyes by coagulation: the performance of preformed polymeric aluminum species. *Journal of hazardous materials*, 143(1-2), 567-574. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.076>.
- Trukawka, M., Cendrowski, K., Peruzynska, M., Augustyniak, A., Nawrotek, P., Drozdziak, M., & Mijowska, E. (2019). Carbonized metal–organic frameworks with trapped cobalt nanoparticles as biocompatible and efficient azo-dye adsorbent. *Environmental Sciences Europe*, 31, 1-15. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0242-9>.