

Revisión bibliográfica de las aplicaciones de aerogeles de Óxido de Grafeno en la remediación y
tratamiento de aguas

Diego Fernando Jaimes Flórez

Deivis Andrés Peña Ríos

Proyecto De Grado Para Optar Al Título De Ingeniero Químico

Director

Rafael Cabanzo Hernández Física,

Física, MSc.

Codirector

Wilmar Antonio Contreras Toloza

Químico

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físicoquímicas

Escuela De Ingeniería Química

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Inicialmente a Dios, quien como guía estuvo presente en el desarrollo de mi vida y mi profesión dándome, entendimiento, sabiduría y fortaleza para continuar con mis metas trazadas sin desfallecer.

A mis abuelos Reyes Flórez Meza (q.e.p.d) y Benilda Castellanos (q.e.p.d) quienes me orientaron, y ayudaron en todo momento siendo el más transparente ejemplo del calor de familia ante las dificultades.

A mi madre Flor Maria Flórez Castellanos y a mi hermano Fabian Leonardo Jaimes Flórez, por su valioso ejemplo y consejos de vida enseñándome que los sacrificios traen recompensas, que en la vida se debe luchar por lo que se quiere, infinitas gracias por brindarme la oportunidad de estudiar, por creer en mí y en mis capacidades. Por esto siempre estaré muy pendiente y agradecido.

Al ingeniero Luis Eugenio Prada Niño por ser un excelente mentor en mi formación profesional y humana, por sus preciados consejos y por brindarme la oportunidad de desarrollar mi vocación profesional desde el alma mater de la UIS.

A mis amigos de toda la vida Anny Godoy, Juliana Salcedo, Heyder Lizarazo, Julián Oviedo, Angie Sandoval, Daniela Mojica, Angie López y Fernanda Gómez por siempre acompañarme en mi formación personal dándome los mejores recuerdos de mi infancia y adolescencia.

A mis muy estimados amigos y colegas que me dio la vida: Dooglas Ochoa, Yudid Anaya, Diana Nova, Giovanni Portilla, Karen Cepeda, Juanca Galvis, Cristian Gómez y Michael Ariza por ser parte del proceso como Ingeniero Químico, animándome a cada día ser mi mejor versión a pesar de los desafíos.

A mis colegas auxiliares Carlos Andrés, Valentina Monsalve, Daniel Patiño, Luis Daniel y a todos los profesionales de la Rectoría y la Vicerrectoría Administrativa con quienes compartí momentos únicos al servicio de la UIS y de quienes aprendí el verdadero valor del compromiso y el trabajo en equipo.

A mi compañero de proyecto Deivis Peña por la continua dedicación, apoyo y perseverancia para la realización de este trabajo de grado.

Diego Fernando Jaimes Flórez

Dedicatoria

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerzas para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis abuelas Dormelina Robles de Peña (q.e.p.d) y María Odila Quintero (q.e.p.d) quienes me orientaron, ayudaron y acompañaron en todo momento, que, aunque no pude contar con su compañía nunca me dejaron solo en este camino y sin ellas no habría sido posible. A ellas siempre las recordaré con mucho amor.

A mis padres Eunice Rios Quintero y Deivis Peña Robles por su valioso ejemplo y consejos de vida enseñándome que los sacrificios traen recompensas, que en la vida se debe luchar por lo que se quiere, infinitas gracias por brindarme la oportunidad de estudiar, por creer en mí y en mis capacidades. Por ello yo también seré un apoyo incondicional en todo momento.

A mi hermano Johan Felipe Peña Rios, por el apoyo constante, por su compañía y la mejor actitud para siempre salir adelante. Por esto siempre estaré muy pendiente y agradecido.

A los profesores que hicieron parte de mi formación académica y personal, por sus valiosas enseñanzas y grandes consejos que me ayudaron a ser lo que soy hoy en día.

A mis muy estimados amigos y colegas que me dio la vida: Haider Prada, Camila Galindo, Alejandra Sua y Jhein Carolina Roa por ser parte del proceso como Ingeniero Químico, ayudándome y animándome a cada día ser mi mejor versión a pesar de los desafíos.

A mi compañero de proyecto Diego Fernando Jaimes Flórez por la continua dedicación, apoyo y perseverancia para la realización de este trabajo de grado.

Deivis Andrés Peña Rios

Agradecimientos

A la **Universidad Industrial de Santander**, por desarrollar y potenciar continuamente nuestra formación moral, ética y como profesionales en Ingeniería Química.

Al Grupo de Investigación **LEAM**, por brindarnos la oportunidad de realizar el presente proyecto de grado y guiarnos en la consolidación de nuestros conocimientos a través del proceso investigativo desarrollado.

Al Doctor **Rafael Cabanzo Hernández**, por compartir sus valiosos conocimientos, acompañamiento, apoyo y compromiso en la ejecución del presente trabajo de grado a pesar de la atípica situación que se vivió durante del desarrollo del mismo.

A nuestro codirector **Wilmar Antonio Contreras Toloza**, por la constante dedicación y esfuerzo brindado para el desarrollo y culminación exitosa de presente trabajo de grado.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2. Marco Teórico.....	13
2.1 Alótropos del carbono	13
2.2 Grafeno.....	14
2.3 Óxido de Grafeno.....	15
2.4 Propiedades destacadas de las Estructuras a base de Óxido de Grafeno.	15
2.5 Síntesis de Óxido de Grafeno.....	16
3 Metodología	18
3.1 Recopilación de información	18
3.2. Criterios de inclusión y exclusión	18
4 Revisión sistemática.....	20
4.1 Búsqueda en base de datos	20
4.2 Selección de artículos.....	22
5 Aerogeles de Óxido de Grafeno –GOA	23
5.1 Métodos de síntesis de aerogeles de Óxido de Grafeno.....	25
5.1.1 Autoensamblaje por congelación.....	25
5.1.2 Tratamiento hidrotérmico	26
5.1.3 Sol gel	27
5.1.4 Método por plantilla de sacrificio o crecimiento asistido por plantilla.	28
6 Aplicaciones de aerogeles de Óxido de Grafeno en la remediación y tratamiento de aguas.	28
6.1 Remoción de metales pesados presentes en agua.....	29
6.2 Remoción de crudo en agua	31
6.3 Tratamiento de agua con presencia microbiana.	34
6.4 Remoción de colorantes presentes en agua	36
6.5 Desalinización de agua.....	38
7 Conclusiones	40
Referencias Bibliográficas	42
Apéndice.....	52

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades destacadas Estructuras a base de Óxido de Grafeno	16
Tabla 2. Métodos químicos Síntesis de Óxido de Grafeno (GO).....	17
Tabla 3. Métodos de remoción metales pesados.	30
Tabla 4. Métodos de remoción de crudos y derivados.	33
Tabla 5. Métodos de remoción de microorganismos.....	35
Tabla 6. Métodos de remoción de colorantes	37
Tabla 7. Métodos de desalinización	40

Lista de Figuras**Pág.**

Figura 1. Resultados búsqueda bibliográfica base de datos ScienceDirect.....	20
Figura 2. Resultados búsqueda bibliográfica base de datos Web of Science.	21
Figura 3. Resultados búsqueda bibliográfica base de datos Scopus.	21
Figura 4. Resultados búsqueda bibliográfica base de datos Springer Link.	22
Figura 5. Diagrama de flujo selección, exclusión y número de estudios seleccionados.	23
Figura 6. Aplicaciones revisadas para tratamiento de aguas con Aerogeles de Óxido de Grafeno.....	29

Lista de Apéndices

Pág.

Apéndice A. Tipos de alótropos y propiedades53

Resumen

Título: Revisión bibliográfica de las aplicaciones de aerogeles de óxido de grafeno en la remediación y tratamiento de aguas *

Autores: Diego Fernando Jaimes Flórez, Deivis Andrés Peña Ríos**

Palabras claves: Óxido de Grafeno, Aerogeles de Óxido de Grafeno, Tratamiento de aguas.

Descripción:

Las industrias generan, como residuo de sus procesos, sustancias contaminantes para el agua; como metales pesados, colorantes, derrames de crudo, entre otros. La contaminación y la recurrente escasez del recurso hídrico denotan una marcada necesidad de tratar y potabilizar el agua para suplir la continua demanda de este recurso como principal servicio en los procesos industriales y consumo poblacional, por ello se estudian tecnologías basadas en Óxido de grafeno (GO) y algunos derivados de este, con altas capacidades de remoción de un amplio rango de sustancias.

Para la presente investigación se desarrolló una revisión bibliográfica a fin de conocer los diferentes métodos de síntesis y aplicaciones de aerogeles de Óxido de Grafeno (GOA) para la remediación y tratamiento de aguas durante una cronología reciente. Se hizo uso de diferentes palabras claves y parámetros de búsqueda en las bases de datos: ScienceDirect, Web of Science, SpringerLink, Scopus, y tesis de grado, seleccionando los estudios más acertados para el tema de investigación de acuerdo al título de artículo, resumen, y palabras claves obteniendo como resultado de búsqueda 1069 artículos que estudian los métodos de síntesis de Óxido de grafeno donde se destaca el método de Hummers y Bodlie y método de síntesis de aerogeles de GO, como el método sol gel, autoensamblaje por congelación, tratamiento hidrotérmico y crecimiento asistido por plantilla y en consecuencia investigar el uso de estos aerogeles en aplicaciones para tratamiento y remediación de agua frente a métodos convencionales con el propósito de realizar comparaciones frente a materiales a base de GO en términos de capacidad de absorción, recuperación del material y su facilidad para producirse a gran escala.

*Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Rafael Cabanzo Hernández. MSc en Física. Codirector: Wilmar Antonio Contreras. Químico.

Abstract

Title: Bibliographic review of applications of graphene oxide aerogels in water remediation and treatment. *

Authors: Diego Fernando Jaimes Flórez, Deivis Andrés Peña Ríos**

Key words: Graphene Oxide, Graphene Oxide Aerogels, Water Treatment

Description:

Industries generate, as waste of their processes, water pollutants; such as heavy metals, dyes, crude oil spills, among others. Pollution and the recurrent shortages of water resources denote a marked need to treat and water purification to meet the continued demand for this resource as the main service in industrial processes and population consumption, so technologies based on graphene oxide (GO) and some derivatives of graphene are studied, with high capacities of removal of a wide range of substances.

For this research, a bibliographic review was developed to learn about the different methods of synthesis and applications of graphene oxide aerogel for the remediation and treatment of water during a recent chronology. Different keywords and search parameters were used in the databases: Science Direct, Web of Science, SpringerLink, Scopus, and undergraduate thesis, selecting the most successful studies for the research topic according to the article title, summary, and keywords obtaining as a search result 1069 articles studying the methods of synthesis of Graphene Oxide highlighting the Hummers and Bodlie method and GO airborne synthesis method, such as the sol gel method, self-assembly by freezing, hydrothermal treatment and template-assisted growth and consequently investigate the use of these aircraft in water treatment and remediation applications against conventional methods for the purpose of making comparisons against GO-based materials in terms of absorption capacity, material recovery and its ease of large-scale production.

* Thesis Degree

** Faculty of physicochemical engineering. School of Chemical Engineering. Director: Rafael Cabanzo Hernández. MSc in Physics. Co-Director: Wilmar Antonio Contreras. Chemist.

Introducción

Las industrias generan, como residuo de sus procesos de producción, algunas de las sustancias más contaminantes para el medio ambiente; dentro de las cuales se encuentran los metales pesados, colorantes, derrames de crudo, entre otros. La contaminación como producto de las industrias y la recurrente escasez de recurso hídrico generan una marcada necesidad de tratar y potabilizar el agua para suplir la continua demanda de este recurso hídrico como principal servicio en los procesos industriales y consumo poblacional.

Se predice que la contaminación industrial aumente junto con el desarrollo económico e industrial ya que algunas de ellas son conocidas por ser altamente contaminantes como es el caso de la industria química la cual se está trasladando a los países de economías emergentes y por ello se debe mitigar su impacto acelerado. (Yousefj, 2019)

Los métodos convencionales, usados en la remoción de este tipo de contaminantes y la potabilización de aguas tales como adsorción, la precipitación, ósmosis inversa, intercambio iónico, entre otros, donde se emplean materiales como carbón activado, alúmina (Bai & C., 2015), gel de sílice (G. & N., 2011), y materiales poliméricos (B., W., L., Q., & S., 2009), resultan actualmente costosos e ineficientes dada la magnitud del problema.

Así, tecnologías emergentes como las que emplean materiales basados en grafeno y algunos derivados de este, con altas capacidades de adsorción y absorción de un amplio rango de sustancias, se han ido desarrollando como mejores prospectos para tal fin. (H. & H., 2016)

En vista de las innumerables aplicaciones que ofrece el grafeno, existe la necesidad de mejorar y optimizar tanto la síntesis como la creación de estructuras que puedan posteriormente ser de fácil producción industrial, es por esto que se están realizando trabajos en la creación de

estructuras tridimensionales de grafeno aprovechando su elevada área superficial y el gran número de grupos funcionales oxigenados que hacen de estructuras como los aerogel de Óxido de Grafeno un buen adsorbente, y su elevada movilidad electrónica, un buen fotocatalizador.

Una buena muestra de ello es que la cantidad de contaminantes que pueden ser eliminados con los aerogel de Óxido de Grafeno no deja de crecer, incluyendo contaminantes como metales pesados, pesticidas, compuestos aromáticos y colorantes de la industria textil, microorganismos, productos petrolíferos presentes en fuentes hídricas, así como proceso de desalinización de agua marina.

Es importante resaltar que el material grafénico esté presente en forma de macroestructura debido a que de esta forma es viable su recuperación en medios acuosos.

Así las cosas, es preciso investigar y comparar la eficiencia y capacidad de remoción de diferentes contaminantes presentes en aguas empleando macroestructuras de Óxido de Grafeno donde se mejore la selectividad iónica de los procesos de adsorción y absorción a fin de comparar los resultados obtenidos de investigaciones ya elaboradas provenientes de diferentes referentes bibliográficos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Realizar una revisión sobre las actuales aplicaciones de aerogeles de Óxido de Grafeno(GO) en remediación y tratamiento de aguas.

1.2 Objetivos específicos

- Presentar los diferentes métodos para la síntesis de aerogeles de Óxido de Grafeno(GO).
- Exponer las diferentes aplicaciones desarrolladas en la actualidad que emplean aerogeles a base de Óxido de Grafeno para el tratamiento de aguas.

2. Marco Teórico

Comparar los resultados obtenidos de los procesos realizados en presencia de aerogeles de Óxido de Grafeno frente a métodos tradicionales de remediación de aguas.

2.1 Alótropos del carbono

El término alótropo se refiere a una o más formas de un elemento químico que ocurren en el mismo estado físico. Las diversas formas surgen de las diferentes maneras en que los átomos pueden unirse entre sí (Goldwhite, 1990). Es así que el carbono presenta los siguientes alótropos detallados también en el Anexo A del presente documento:

1. Fullerenos
2. Nanotubos de carbono
3. Diamante
4. Grafito

5. Grafeno

2.2 Grafeno

El grafeno es el alótropo bidimensional del carbono. Estructuralmente, se define como un arreglo cristalino formado por átomos de carbono con hibridación Sp^2 , los cuales se encuentran densamente empaquetados en una red hexagonal semejante a un panal de abejas (Terrones, y otros, 2010). Inicialmente, el grafeno se consideró como un modelo teórico para describir la formación de otros alótropos del carbono (Sciences, T. R., 2010).

Antes de su descubrimiento, se pensaba que las láminas de grafeno no podían separarse sin que las vibraciones atómicas, a temperatura ambiente, las destruyeran. Ahora es conocido que el material es estable porque sus vibraciones se acomodan en ondulaciones con amplitudes de ~ 1 nm a lo largo de la red. Este comportamiento es intrínseco del grafeno y se origina como resultado de cierta inestabilidad vibracional en su estructura cristalina (Martínez, Cifuentes, & Coss, 2009).

El grafeno es un material constituido por láminas individuales; sin embargo, también se han estudiado estructuras formadas por dos o más láminas, conocidas como grafeno bicapa o multicapa, las cuales exhiben propiedades estructurales y electrónicas diferentes al grafeno. Se considera a un cristal de grafito como producto de la superposición ordenada (hexagonal) de más de cien láminas de grafeno (Choi, Lahiri, Seelaboyina, & Kang, 2010).

2.3 Óxido de Grafeno.

El óxido de grafeno es considerado como óxido de grafito con alto grado de exfoliación, donde sus láminas pueden estar totalmente separadas en suspensión líquida (Gomez, 2012). Se produce por tratamiento químico del grafito a través de la oxidación, posterior exfoliación y dispersión en agua o algún solvente adecuado (Chen D., 2012).

Se han propuesto diversos modelos estructurales de GO debido a: la incertidumbre de la naturaleza y distribución de los grupos funcionales presentes, ya que, a nanoescala el GO presenta heterogeneidad en su estructura; a que la estequiometría varía dependiendo del protocolo de síntesis y de la extensión de la reacción.

La presencia de grupos funcionales puede otorgarle al GO grandes ventajas en diferentes aplicaciones debido a que los grupos funcionales polares hacen que el GO sea fuertemente hidrófilo, permitiéndole dispersarse en muchos disolventes, en particular en agua. (Sharma, 2013).

La capacidad adsorbente del GO se debe, a la densidad de carga negativa otorgada por los grupos funcionales oxigenados presentes, lo que permite interacciones electrostáticas entre las cargas del GO y las cargas del adsorbato; a su alta solubilidad en agua y a su gran área superficial (G.K, R.2011).

2.4 Propiedades destacadas de las Estructuras a base de Óxido de Grafeno.

Dada la facilidad de obtener Óxido de Grafeno, material que presenta propiedades electrónicas, ópticas, mecánicas, térmicas y químicas y principalmente debido al tamaño de partícula micrométrico propio del Óxido de Grafeno es posible trabajar con mayor facilidad en la elaboración de estructuras 3D. Entre las propiedades de interés de las estructuras a base de GO para el objeto de la presente investigación se destacan:

Tabla 1.*Propiedades destacadas Estructuras a base de Óxido de Grafeno.*

Propiedades	Característica
Tamaño de poro	Los materiales 3D basados en grafeno como aerogeles y espumas pueden formar una red espacial tridimensional con estructura microporosa, mesoporosa y macroporosa mediante el control efectivo de las condiciones de preparación, creando condiciones para la libre difusión de moléculas o iones Contaminantes (Fang, y otros, 2014).
Propiedades de adsorción	El grafeno posee una gran área superficial específica (SSA) de 2,600 m ² /g con excelente capacidad de adsorción (Stoller, Park, Zhu, An, & Ruoff, 2008). Sin embargo, las nanoláminas de grafeno tienden a agregarse y volver a apilarse entre sí debido a las fuertes interacciones hidrofóbicas, interacciones π - π y las fuerzas de van der Waals entre capas intermedias (Zhang, y otros, 2014). Por ello las macroestructuras de grafeno 3D, tales como aerogeles, e hidrogeles, pueden evitar el apilamiento. Las macroestructuras 3D a base de grafeno no solo conservan la gran área superficial, también permiten una estructura Altamente porosa (J., A., & S., 2009).

2.5 Síntesis de Óxido de Grafeno

La producción de Óxido de Grafeno GO ha sido probada mediante métodos sintéticos convencionales. La versatilidad de varios métodos analíticos para la producción industrial escalable de GO se representa en la siguiente tabla No.2 (Ikram, Mohamed Jan, & Ahmad, 2020) donde se detalla el Nombre del método de síntesis de GO, los reactivos y condiciones de síntesis, así como las ventajas y desventajas encontradas en cada uno de los procedimientos realizados.

Dentro de los métodos de Síntesis y elaboración de Óxido de grafeno se destacan los siguientes:

Tabla 2.

Métodos químicos Síntesis de Óxido de Grafeno (GO) (Ikram, Mohamed Jan, & Ahmad, 2020).

Método / año	Reactivos y condiciones	Ventajas	Inconvenientes
Método de Bodlie (1859)	HNO ₃ / KClO ₃ 3-4 días, 60 °C	Se determinó la deslaminación de Grafito en hojas GO por oxidación.	-Riesgo de explosión por uso de KClO ₃ -Proceso lento -Toxicidad -Producto dispersable en solución básica, tamaño pequeño, espesor limitado y estructura imperfecta.
Método de Staudenmaier (1898)	KClO ₃ / HNO ₃ / H ₂ SO ₄ 3-4 días, 90 °C	-La oxidación se completa en un solo paso. -Eficiencia del proceso mejorada.	-Proceso lento -Riesgo de explosión -Toxicidad
Método de Hummers (1958)	KMnO ₄ / NaNO ₃ / H ₂ SO ₄ 2 h, 35 a 98 °C	-Adecuado para operaciones a gran escala. -Mejor eficiencia de oxidación. -Sin riesgo de explosión	-Oxidación incompleta -Tediosa separación y purificación del producto. -Gases tóxicos: (NO ₂ , N ₂ O ₄) - Iones residuales Na ⁺ y NO ₃ ⁻ difíciles de eliminar de agua, -Bajo rendimiento del producto.
Método del Tour (2010)	KMnO ₄ / H ₂ SO ₄ / H ₃ PO ₃ 12 h, 50 °C	-No hay desprendimiento de gases tóxicos: NO ₂ , N ₂ , O ₄ -Mayor rendimiento del producto. -GO formado más oxidado y soluble	-Se necesita una alta concentración de oxidantes. -Proceso lento.
Método Hummers modificado y mejorado (2013)	KMnO ₄ / H ₂ SO ₄ 1,5 h, Temperatura ambiente.	-No toxicidad. -Fácil control de la temperatura.	-Difícil separación de productos.
Método de Peng (2015)	K ₂ FeO ₄ / H ₂ SO ₄ 1h, Temperatura ambiente.	-Sin toxicidad, no se utilizan metales pesados. -Proceso verde escalable	-Se requiere centrifugación repetida para obtener producto puro.
Método Hummers modificado	KMnO ₄ / H ₂ SO ₄ / NaNO ₃ ó KMnO ₄ / H ₂ SO ₄ 2-4 h, 35 - 110°C	-No se libera NO. - Alto grado de oxidación Mejor rendimiento del producto.	-Procesos tediosos de separación y purificación involucrados. -Proceso que consume mucho tiempo.
Método Hummers mejorado.	KMnO ₄ / H ₂ SO ₄ / H ₃ PO ₄	-Alto rendimiento GO -No se desprenden gases tóxicos -El producto GO tiene una estructura más organizada.	-Procesos tediosos de separación y purificación involucrados. -Proceso que consume mucho tiempo.

3 Metodología

3.1 Recopilación de información

Para el desarrollo del presente trabajo de grado, se realizó una revisión conceptual, en las principales fuentes bibliográficas y bases de datos científicas y repositorio Bibliográfico de la Universidad Industrial de Santander entre las cuales se desatacan: Science direct, Elsevier, Springer, Scopus, Web of Science, Taylor & Francis, Proquest central, Ebsco host entre otras fuentes.

Se seleccionaron los artículos, reviews, tesis y documentos más relevantes publicados en los últimos años todos relacionados con los diferentes métodos de síntesis de GO y síntesis de aerogel de GO. En tal sentido se escogió principalmente aquellos artículos que tratan las diferentes aplicaciones de aerogel de Óxido de Grafeno en la remediación de aguas y eliminación de contaminantes presentes en fuentes hídricas.

La búsqueda se realizó principalmente en lengua inglesa y castellana basado en el hecho de ser lenguas vehiculares en el campo de la Ingeniería, Ciencia y Tecnología y el desarrollo de investigaciones relacionadas a la síntesis y aplicaciones de estructuras y aerogel a base de Óxido de Grafeno. Se seleccionaron y analizaron los artículos encontrados, basándonos en primer lugar en la búsqueda de palabras claves, título de la investigación y en la lectura del “abstract” de cada uno y en caso de concordancia con nuestro objeto de estudio, el artículo completo.

3.2. Criterios de inclusión y exclusión

En este orden de ideas se establecieron diferentes criterios de inclusión y exclusión para la acertada selección de la información que compete a nuestros objetivos de investigación, de la siguiente manera:

Se incluyeron los artículos que cumplieron con los siguientes requisitos:

- Artículos cuyo contenido plantee los métodos y procedimientos de síntesis de GO y síntesis de aerogeles de Óxido de Grafeno donde se detalle los compuestos, reactivos empleados y su resultado final.
- Artículos donde se contemple la realización de investigaciones de síntesis de GO y aerogeles de GO como material empleado para la eliminación de diferentes contaminantes presentes en aguas ya sean residuales o sencillamente fuentes hídricas.
- Artículos publicados con una cronología reciente a fin de tratar las últimas técnicas, aplicaciones empleadas y procedimientos mejorados de acuerdo con nuestro tema de interés.
- Artículos de acceso abierto según filtros realizados en bases de datos.

Se excluirán los artículos con las siguientes características:

- Artículos con un periodo de publicación muy antiguo y que estudian únicamente el marco conceptual del Óxido de Grafeno.
- Artículos cuyo título no refiera tratamiento de aguas o aerogeles de Óxido de Grafeno, o las palabras claves tabuladas en la búsqueda bibliográfica.
- Artículos cuyo “abstract” no contenga estudios relacionados con los objetivos de investigación.
- Artículos donde se use el Óxido de Grafeno en aplicaciones diferentes al tratamiento y remediación de agua.
- Artículos que emplean el Óxido de Grafeno en Matrices orgánicas complejas y no usan algún

tipo de aerogeles o estructura basada en Óxido de Grafeno.

- Artículos que no figuren con la disciplina o área de estudio.

Así las cosas, a partir de los criterios de inclusión y exclusión referidos anteriormente se procedió a tabular y representar gráficamente los diferentes resultados teniendo en cuenta las bases de datos en donde se realizó la búsqueda, las palabras claves más afines al tema de investigación y la periodicidad de publicación de los artículos.

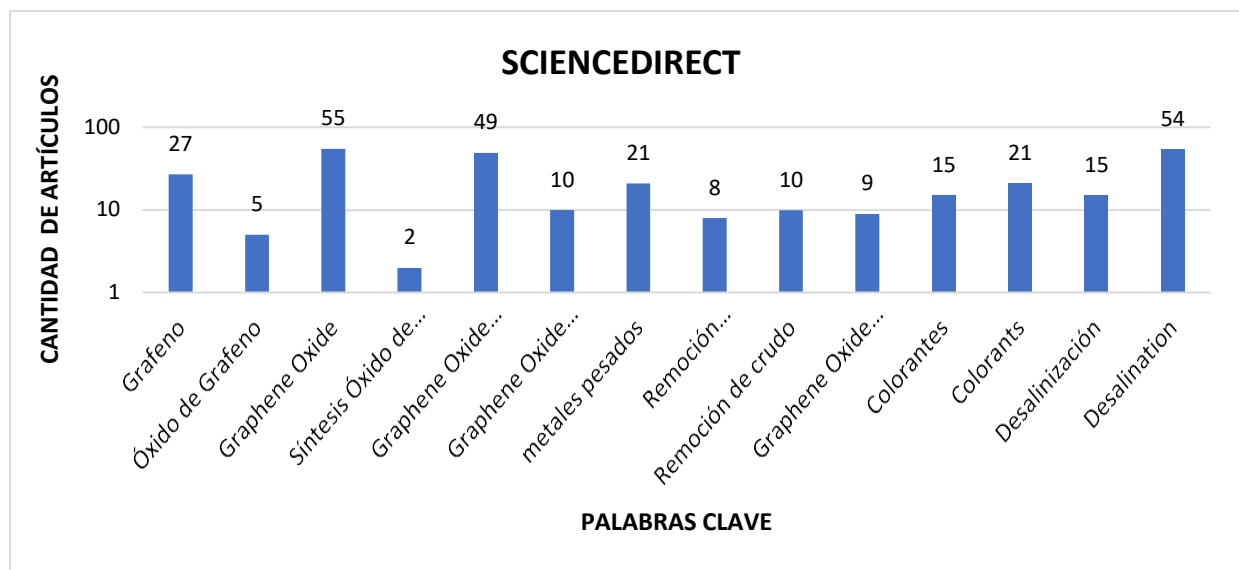
4 Revisión sistemática

4.1 Búsqueda en base de datos

La estrategia de búsqueda y el número de resultados para la base de datos *SCIENCEDIRECT* se detalla en la siguiente representación gráfica:

Figura 1.

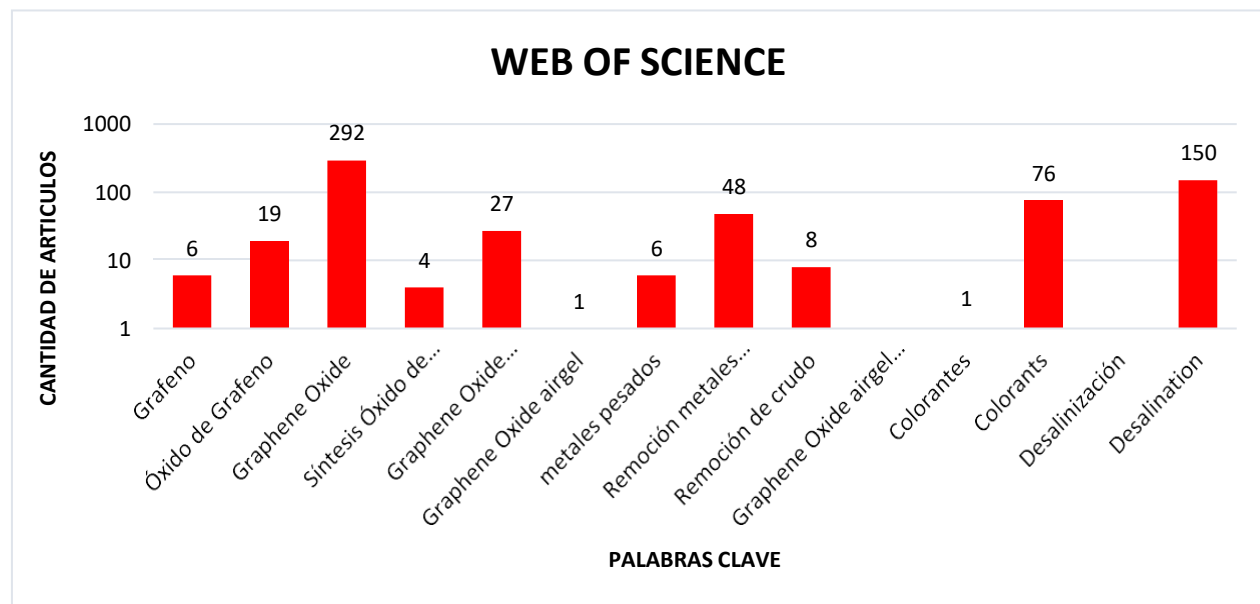
Resultados búsqueda bibliográfica base de datos ScienceDirect.



La estrategia de búsqueda y el número de resultados para la base de datos **WEB OF SCIENCE** se detalla en la siguiente representación gráfica:

Figura 2.

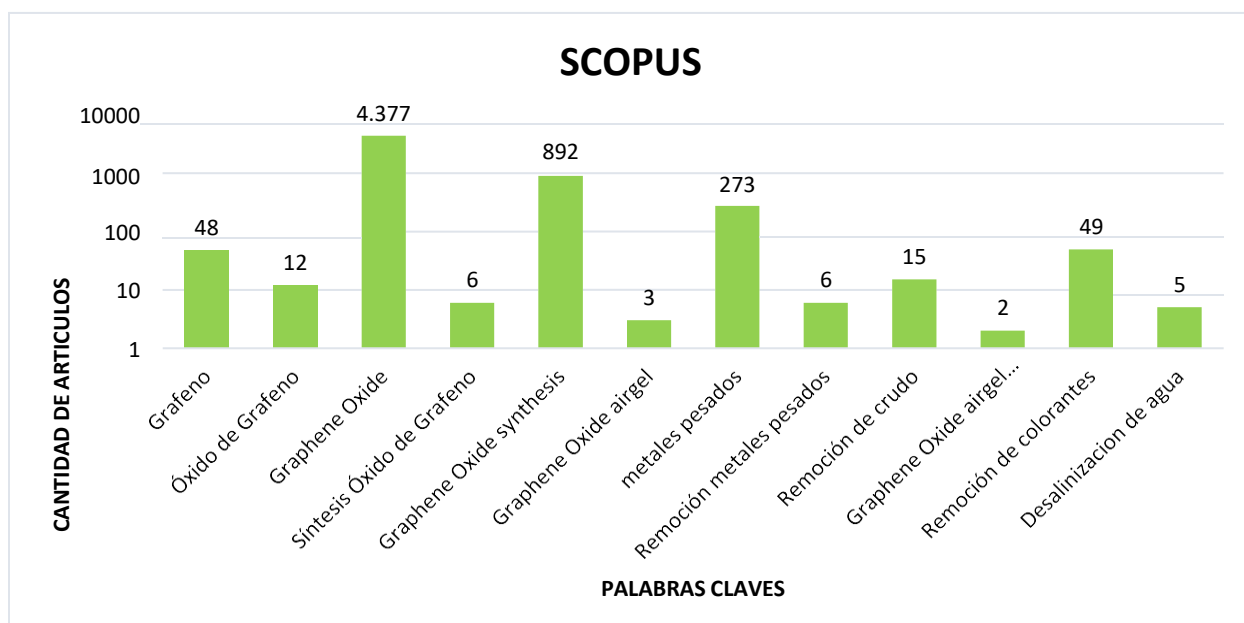
Resultados búsqueda bibliográfica base de datos Web of Science.



La estrategia de búsqueda y el número de resultados para la base de **SCOPUS** se detalla en la siguiente representación gráfica:

Figura 3.

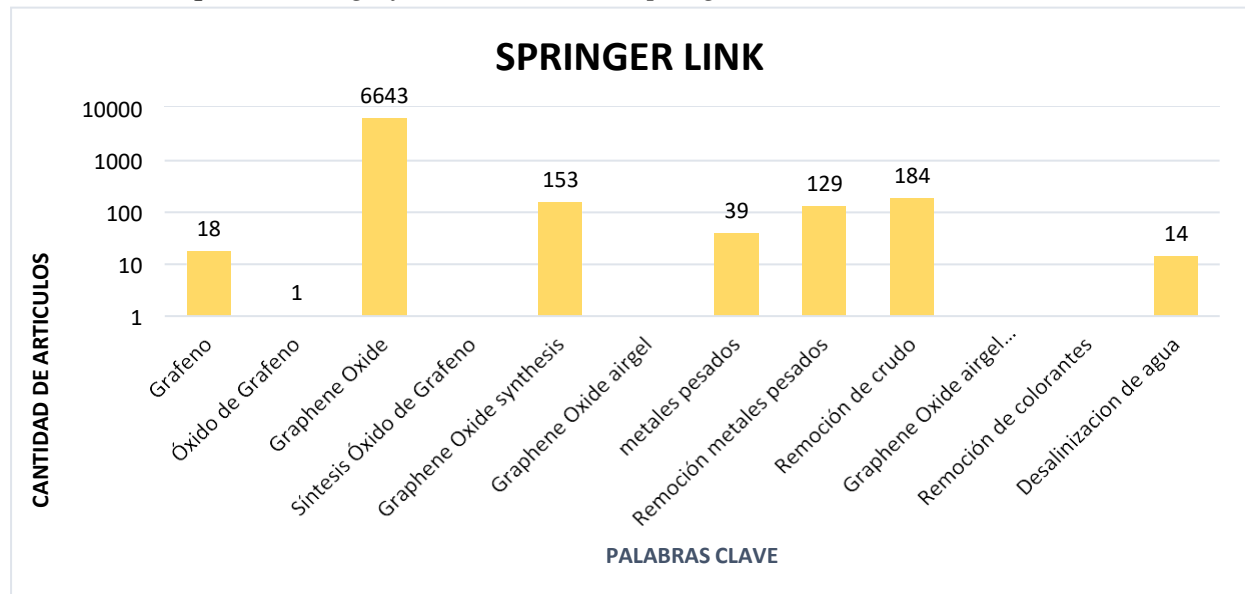
Resultados búsqueda bibliográfica base de datos Scopus.



La estrategia de búsqueda y el número de resultados para la base de SPRINGER LINK se detalla en la siguiente representación gráfica:

Figura 4.

Resultados búsqueda bibliográfica base de datos Springer Link.



4.2 Selección de artículos

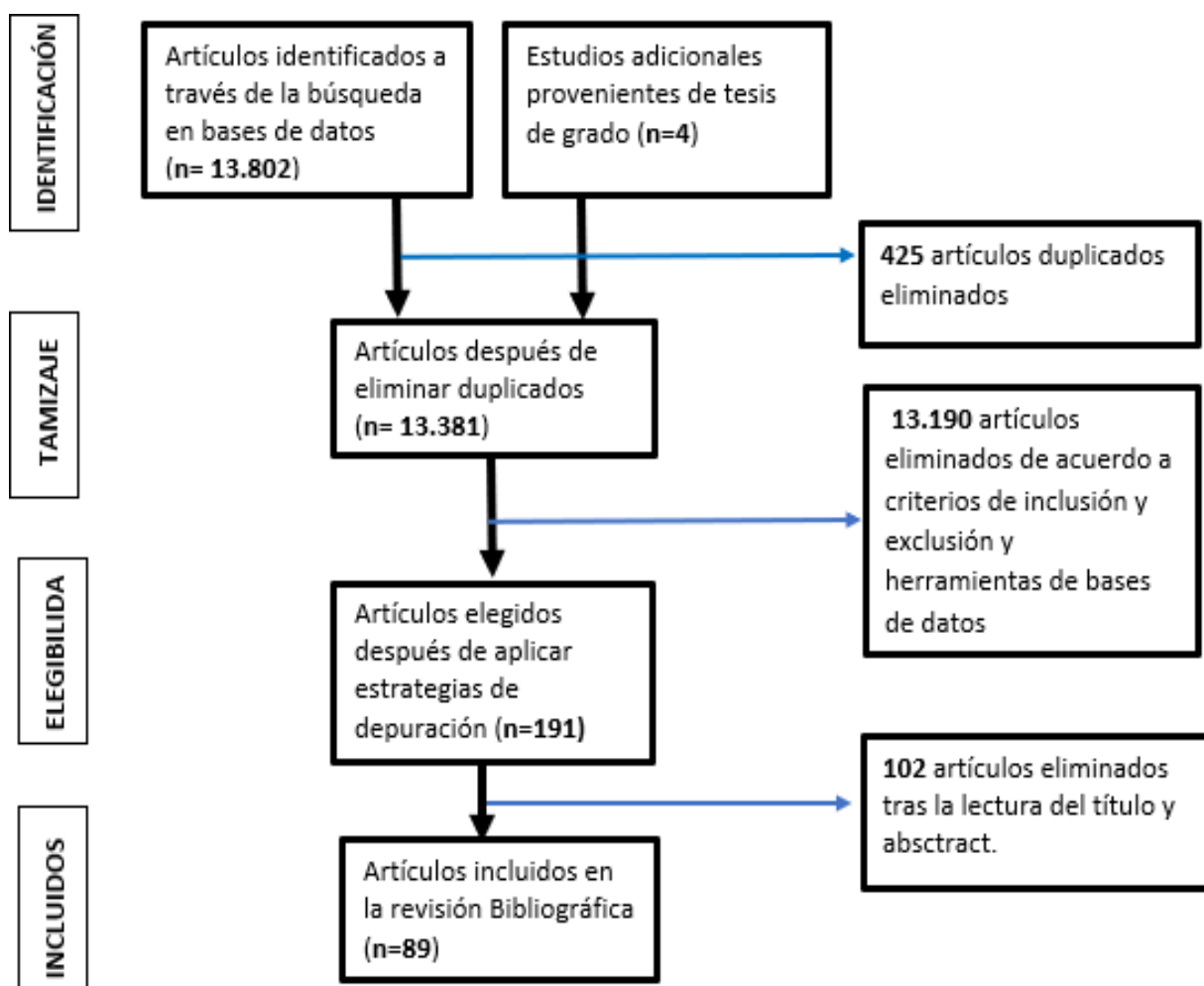
Realizada la búsqueda bibliográfica en las bases de datos: ScienceDirect, Web of Science, Scopus, Springer Enlace y banco de tesis de la Universidad Industrial de Santander y empleando las estrategias de búsqueda referidas de palabras clave, título del artículo y resumen se obtuvo como resultados 301, 632, 5.688, 7.181 y 4 documentos respectivamente. En consecuencia, se eliminaron 425 documentos duplicados entre las bases de datos. Posteriormente, se realizó rigurosamente la respectiva depuración de los artículos de acuerdo con los criterios de inclusión y exclusión, títulos, resúmenes y herramientas propias de cada una de las bases de datos para llevar a cabo la selección de artículos a incluir en la investigación.

De esta manera de acuerdo con las estrategias de búsqueda y depuración de artículos se eliminaron 13.717 documentos, para finalmente seleccionar 89 artículos para la revisión

bibliográfica de síntesis de GO, síntesis de aerogel de GO y sus aplicaciones en la remediación y tratamiento de aguas. El proceso aquí descrito se representa en el siguiente diagrama de flujo:

Figura 5.

Diagrama de flujo selección, exclusión y número de estudios seleccionados.



5 Aerogel de Óxido de Grafeno –GOA

Los aerogel de Óxido de Grafeno se pueden definir como una estructura porosa conformada por dos fases, la fase continua es sólida y la fase dispersa es un gas. La fase continua son láminas de GO que forman el GOA.

Su estructura se encuentra integrada por partículas nanométricas de tamaño variable y que están agrupadas en clústers ramificados también de tamaño variable. El diámetro de las partículas depende de ciertos factores de síntesis y oscila entre 3 y 100 nm. Los espacios vacíos que existen entre los clústers de nanopartículas conforman la estructura de macroporos mientras que los espacios intersticiales presentes en los clústers entre las nanopartículas de aerogel conforman la red de mesoporos. (Hanzawa, Kaneko, Yoshizawa, Pekala, & Dresselhaus, 1998) (Pekala, Alviso, Kong, & Hulsey, 1992).

En cuanto al tamaño de poro, podemos encontrar distribuciones unimodales que pueden ir de 3 a los 15 nm o distribuciones bimodales en los mismos rangos de tamaño (Tamon, Ishizaka, Mikami, & Okazaki, 1997). En el rango de los macroporos, se pueden encontrar tamaños de los 60 a más de 100 nm dependiendo este parámetro del procedimiento de secado del gel (Job, y otros, 2005).

El tamaño y grado de agregación de las nanopartículas que conforman los GOA se pueden definir controlando las condiciones de síntesis del aerogel, lo que a su vez definirá las propiedades texturales (Tamon, Ishizaka, Araki, & Okazaki, 1998) (Tamon & Ishizaka, 2000). Son las características del GO y las condiciones de síntesis de los aerogeles las que confieren las propiedades texturales y las propiedades físicas. Con respecto a las propiedades texturales, los GOA presentan una superficie específica entre 500 y 750 m²/g para aerogeles pirolizados (proceso donde se consigue aumentar el área superficial del material por aumento del número de microporos y mesoporos) (Al-Muhtased & Ritter, 2003) hasta más de 3000 m²/g para aerogeles activados (obtenidos de procesos térmicos para crear porosidad adicional) (Baumann, Worsley, Han, & Statcher, 2008), con volúmenes de poro que van de 0,1 a cerca de 2 cm³/g para los aerogeles más activados.

La estructura porosa de los GOA combina las ventajas de su alta capacidad de absorción con excelentes propiedades mecánicas generando así un eficiente desempeño en la captura de partículas más pequeñas de hasta 2,5 μm y de igual manera proporcione una elevada capacidad en el reciclaje del aerogel ya que puede ser usado repetidamente y mantener una alta eficiencia de filtración después de un simple reciclaje.

Las destacadas propiedades que poseen los GOA permiten ser usado en aplicaciones como absorbente para la retención selectiva de compuestos orgánicos. Es por ello que los GOA son materiales altamente atractivos para la absorción o degradación de contaminantes y remediación ambiental, debido a su gran superficie específica, baja densidad y a que contiene grupos funcionales ricos en oxígeno como grupos carboxilo, hidroxilo, epoxi, así como electrones π no apareados los cuales establecen interacciones con compuestos orgánicos presentes en agua, facilitando la captura de estas partículas contaminantes (Wang, y otros, 2017).

5.1 Métodos de síntesis de aerogel de Óxido de Grafeno

5.1.1 Autoensamblaje por congelación

Se parte de una dispersión acuosa que se congela y será el propio hielo el que actuará como plantilla de sacrificio. Al congelarse la dispersión acuosa se formará el criogel, o cristales de hielo de un tamaño que variará con la velocidad de enfriamiento (Wang, Wang, Wang, Bin Wang, & Xia, 2014) (Petrov & Georgiev, 2011). Durante la congelación los cristales comprimen las paredes de la estructura haciéndolo más estable.

Los hidrogeles son secados en condiciones supercríticas (Tewari, Hunt, & Lofftua, 1985) (Soleimani Dorcheh, Abbasi, & Mater, 2008) y después de ello ocurre el intercambio de disolventes; de agua a acetona o etanol y después a CO_2 .

Para eliminar las tensiones en la interfase líquido-vapor y evitar destruir poros se realiza

liofilización (Job, y otros, 2005) (Bryning, y otros, 2007) (Klvana, y otros, 1989). Este método presenta algunas desventajas como: En la evaporación del disolvente se puede destruir la estructura porosa debido a las fuerzas Inter capilares ejercidas sobre los poros durante el secado (Job , y otros, 2005).

5.1.2 Tratamiento hidrotérmico

Se parte de una dispersión acuosa de GO y el ensamblaje ocurre a través de reducción de GO en donde el número de grupos funcionales oxigenados disminuye lo que ocasiona una alta interacción hidrofóbica entre las láminas de GO. En este proceso la mitad de la masa inicial de GO es reducida y se realiza en un tiempo < 6 horas y temperaturas entre 150-180 °C disminuyendo la hidrofiliidad y generando pérdida de cargas superficiales sobre las láminas de grafeno, produciendo así la unión entre las láminas de grafeno y la separación de fases entre el hidrogel de grafeno y el agua (Zhang, Li, Yang, & Phys, 2015)

En el proceso de autoensamblaje, los grupos funcionales de GO son eliminados transformando una cuarta parte de la masa inicial de GO en CO₂. El proceso de liofilización permite la compresión de las paredes y la eliminación del agua residual para formar la estructura porosa final.

Autores como Hu y col. (Hu, Xie, Szkopek, & Cerruti, 2016) atribuyen la formación de poros a la cantidad de CO₂ que se genera durante la reducción hidrotérmica (Hu, Xie, Szkopek, & Cerruti, 2016). El CO₂ generado queda retenido en el hidrogel durante el tratamiento, el cual, es en parte, el responsable de la morfología microporosa final del aerogel.

Este método presenta las siguientes ventajas:

- Fácilmente escalable

- se pueden controlar los parámetros estructurales
- Se obtienen extraordinarias propiedades mecánicas y alta reactividad química. El método presenta las siguientes desventajas:
 - La concentración y tamaño de las láminas de GO afecta la formación de la estructura porosa.
 - Existe una concentración crítica que dependerá del tamaño inicial de las láminas de GO) que debe tener la dispersión inicial para que se dé el autoensamblaje de las láminas de G. (Deng, Fang, Zhou, Cao, & Liu, 2016).

5.1.3 Sol gel

El método sol-gel se inicia con la formación de una suspensión coloidal de partículas sólidas o sol, la cual puede ser sometida a una transición de fase mediante desestabilización, precipitación o supersaturación, a fin de obtener una masa sólida.

Uno de los productos obtenidos en esta transición es el gel, donde además de la fase sólida existe un subproducto solvente que puede ser agua o alcohol. (Caldwell, 1934).

Para acortar el proceso se usan catalizadores ácidos o básicos, en la condensación, el sol se convierte en gel rígido que abarca el volumen del contenedor donde está el sol.

Una vez madurado el gel y al secarlo a condiciones de presión y temperatura por arriba del punto crítico, se debe extraer toda el agua que queda dentro de los poros, una vez más, el tiempo que se necesita para este proceso depende del grosor del gel.

Cuando se utilizan condiciones supercríticas se extrae el líquido remanente dentro del gel, dejando sólo la red entrelazada, el proceso se puede llevar a cabo mediante la evaporación de etanol por encima de su punto crítico o mediante un intercambio del solvente con CO₂ seguido de una evaporación supercrítica. (Gleiter, 1995).

La principal ventaja de este método es el control que se puede ejercer sobre el tamaño y la morfología de las partículas mediante el precursor utilizado y controlando la hidrólisis de este mediante el pH (Zhao, Wu, Li, Lu, & Jiang, 2008).

El método tiene la limitación de que solamente puede ser aplicado con derivados alcóxidos de metales, para poder sufrir las reacciones de policondensación que se necesitan para la formación de la red polimérica que da lugar al gel. (Parras, y otros, 2013). Además, la cinética de la reacción es poco práctica por su lentitud a temperatura ambiente, por lo que a menudo se necesitan varios días para llevarla a cabo totalmente. (Martín Sánchez, 1996).

5.1.4 Método por plantilla de sacrificio o crecimiento asistido por plantilla.

Las plantillas de sacrificio de níquel o hierro, para el crecimiento de aerogeles de Óxido de Grafeno a fin de obtener estructuras definidas por deposición química de vapor CVD, y resultando con pocos defectos y una elevada conductividad. Este método es difícilmente escalable, por las altas temperaturas necesarias, el proceso a realizar en varias etapas y el uso de reactivos peligrosos para la eliminación de la plantilla.

De igual manera la preparación de GOA ocurre empapando moldes de alumina o silice en dispersiones de óxido de grafeno. También requiere la eliminación de plantillas con reactivos peligrosos, aunque se podría evitar este paso mediante el autotemplado directo de GO en dispersiones acuosas, con abundantes grupos funcionales, lo que favorece el ensamblaje de nanolaminas en diferentes formas macroscópicas. (Novoselov, y otros, 2004).

6 Aplicaciones de aerogeles de Óxido de Grafeno en la remediación y tratamiento de aguas.

En el presente trabajo se revisaron diferentes aplicaciones en las que se emplean Aerogéles de Óxido de Grafeno como alternativa de alto rendimiento para la remediación y tratamiento de agua

con presencia de los siguientes contaminantes:

Figura 6.

Aplicaciones revisadas para tratamiento de aguas con Aerogeles de Óxido de Grafeno



6.1 Remoción de metales pesados presentes en agua

Remoción de Metales pesados con Aerogeles de Óxido de Grafeno:

Las aguas residuales de procesos industriales, aguas superficiales, drenajes agrícolas y también en el lixiviado ácido de rellenos sanitarios y subterráneas pueden contener varias iones metálicos, como Hg^{2+} tóxico, Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , As^{3+} , Sb^{3+} , Bi^{3+} , etc. (Khan, Cao, Zheng, Huang, & Zhu, 2008).

Los mecanismos de adsorción de iones de metales pesados en la superficie del aerogel de GO se atribuyeron a la atracción electrostática, el intercambio iónico, su gran área superficial y cantidad de grupos funcionales oxigenados (Geim & Novoselov, 2007). Esta atracción electrostática entre los iones metálicos pesados cargados positivamente y las láminas GO cargadas negativamente proporcionan una fuerza impulsora para la adsorción, (Lerf, He, Forster, Klinowski, & Phys, 1998) reportándose así que la reacción de intercambio iónico entre los iones de metales pesados y protones en los grupos funcionales oxigenados COOH o $-\text{OH}$ es un mecanismo eficiente para la adsorción (Dreyer, Park, Bielawski, & Ruoff, 2010) (Zhu, y otros, 2010).

Los resultados muestran diferencias significativas en la capacidad de sorción de óxidos de grafeno con diferente química de superficie. También las propiedades químicas de los iones utilizados para la sorción como valencia diferente, estabilidad frente a la hidrólisis (Malik, y otros, 2010). el potencial de reducción, los radios iónicos y la capacidad de coordinación son cruciales para su capacidad de sorción (Pumera, Ambrosi, Bonanni, Chng, & Poh, 2010) (Brownson, Kampouris, & Banks, 2012).

Tabla 3.

Métodos de remoción metales pesados.

Método	Metales removidos	Capacidad de remoción
Precipitación Química	Ni ²⁺ , Zn ²⁺ , Al ²⁺	Ni ²⁺ , Zn ²⁺ , Al ²⁺ : 80%-90%
	Hg ²⁺ , Cr ³⁺ , As ⁵⁺ , Cu ²⁺ , Cd ²⁺ , Pb ²⁺	Hg ²⁺ , Cr ³⁺ , As ⁵⁺ , Cu ²⁺ , Cd ²⁺ , Pb ²⁺ : > 95%- 99% (Chen, Luo, Hills, Xue, & Tvrer, 2009) (Huisman, Schouten, & Schultz, 2006).
Intercambio Iónico	Fe ²⁺ , Cu ²⁺ , Zn ²⁺ , Cd ²⁺ ,	Fe ²⁺ , Cu ²⁺ , Zn ²⁺ , Cd ²⁺ , Pb ²⁺ : 60%-90%
	Pb ²⁺ , Cr ³⁺ , Ni ²⁺ , Cu ²⁺ ,	Cr ³⁺ , Ni ²⁺ , Cu ²⁺ , Cd ²⁺ , Co ²⁺ : 29.95-
	Cd ²⁺ , Co ²⁺ :	157.25 mg/g (Zewail & Yousef, 2015).
Filtración por membrana	Cu ²⁺ :	Cu ²⁺ : 31%-41%
	Co ²⁺ :	Co ²⁺ : > 75%
	Cu ²⁺ , Fe ²⁺ : Mo ²⁺ :	Cu ²⁺ , Fe ²⁺ : 96.6%-99.5% Mo ²⁺ : 45.2%-66.6% (Taylor & Wiesner, 2002).
Adsorción	Cr ³⁺ , Cu ²⁺ , Pb ²⁺ ,	Cr ³⁺ , Cu ²⁺ , Pb ²⁺ , Zn ²⁺ : 93%-99%
	Zn ²⁺ , Fe ²⁺ , Pb ²⁺	Fe ²⁺ , Pb ²⁺ , Cu ²⁺ , Ni ²⁺ : 99,25%, 96,954% (Huang, y otros, 2014)

	$\text{Cu}^{2+}, \text{Ni}^{2+}$	
Aerogeles de Óxido	$\text{Ni}^{2+}, \text{Zn}^{2+}, \text{Al}^{2+}$:	
Grafeno	$\text{Hg}^{2+}, \text{Cr}^{3+}, \text{As}^{5+}, \text{Cu}^{2+},$ $\text{Cd}^{2+}, \text{Pb}^{2+}$	99% (Brownson, Kampouris, & Banks, 2012)

Hecha la revisión de investigaciones para remoción de metales pesados, las técnicas convencionales presentan valores variados que dependen del metal o grupo de metales que se está removiendo, por ello frente a los valores alcanzados en las investigaciones realizadas con el GOA es notoria la gran ventaja que presenta esta estructura basada en Grafeno pues su capacidad de remoción es superior, específicamente del 99%, además de abarcar un grupo de metales pesados más variado y completo.

Del mismo modo el GOA presenta como característica diferenciadora en comparación a los métodos convencionales de poderse reutilizar sin afectar notoriamente su capacidad de adsorción, resultado del proceso elaborado de síntesis, los reactivos empleados y el tiempo de síntesis requerido, lo que evidencia que el uso de GOA para remover metales es el método más eficiente sobre los empleados tradicionalmente.

6.2 Remoción de crudo en agua

Remoción de crudo con Aerogeles de Óxido de Grafeno:

Se han realizado experimentos tomando muestras de crudo emulsificado a temperatura ambiente, volúmenes iguales y a diferentes concentraciones, se midió la adsorción de cada una y se seleccionó el aerogel de GO sometido a variaciones en tiempo de ultrasonido aplicado durante la síntesis para hacer la prueba de remoción de crudo en las distintas emulsiones preparadas (Pan, Zhang, Lv, Zhang, & Zheng, 2009).

Para todos los ensayos se ha utilizado el mismo aerogel en las diferentes muestras de crudo emulsificado. Se adicionó el aerogel de GO por un tiempo determinado, iniciando con la emulsión de concentración más baja y terminando con la de mayor concentración (Zhu, y otros, 2015). Se reportaron concentraciones antes y después de ser removido el crudo de la emulsión evidenciando una disminución de la concentración del crudo, lo que indica que el aerogel de GO retira eficientemente el crudo (Vickery, Patil, & Mann, 2009).

La aplicación de tiempos de ultrasonido durante la síntesis del aerogel de GO ha permitido el crecimiento de una estructura con buena cohesión. Siendo esta ruta una alternativa amigable al medio ambiente, de fácil seguimiento, además soporta hasta 8000 veces su propio peso y llega hasta una tensión de ruptura de 260 KPa (Ali & Gupta, 2006).

Las pruebas de remoción han evidenciado que el aerogel de GO actúa eficientemente en la remediación ambiental de efluentes contaminados con hidrocarburos, ya que el aerogel recuperado fácilmente por encontrarse como un solo agregado y por tener una densidad menor a la del agua (Crini, G, 2006).

Tabla 4.

Métodos de remoción de crudos y derivados.

Método	Crudos y derivados removidos	Capacidad de adsorción
Quema de crudo in situ	Crudos pesados	Crudos pesados
	Crudos Livianos	70%, 1 mm/min (SRL, 2021)
		Crudos Livianos 95%, 3,75mm/min (ITOPF, 2021)

Dispersantes	Crudos pesados,	
	Crudos Livianos,	
	Combustóleo,	75% -80% (Crini, G, 2006).
	Gasolina	
Absorbentes y adsorbentes	Querosén	Querosén:
	Diesel	• 500 mg/mL:99,8%
	Heptano	• 250 mg/mL: 92,8%
	(Danglad, Marfisi, Cova, & Linero, 2013).	• 150 mg/mL:81,1%
		Diesel:
		• 500 mg/mL:94,3%
		• 250 mg/mL: 76,2%
		• 150 mg/mL:91,4%
		Heptano:
		• 500 mg/mL:93,3%
	• 250 mg/mL: 97,4%	
	• 150 mg/mL:97,7%	
Aerogeles de Óxido de Grafeno	Crudo ligero de 36.5°API (Franco, Martínez, Benjumea, Patiño, & Cortés, 2014).	98.90 % (Pan, Zhang, Lv, Zhang, & Zheng, 2009).

Analizados los procesos de remoción de crudo en agua se evidenciaron que los aerogeles de GO actúan con una eficiencia del 98.90%, valores que son muy semejantes a técnicas convencionales de adsorción y absorción, teniendo una enorme ventaja sobre los métodos convencionales ya que el aerogel es recuperado fácilmente y adicional a ello tener una densidad menor a la del agua lo que convierte a estas estructuras basadas en grafeno como la mejor alternativa para la remoción de crudo, aquí es importante destacar que de acuerdo a los estudios estos valores de remoción pueden variar de acuerdo a la concentración del crudo o el tipo de derivado que sea tratado.

6.3 Tratamiento de agua con presencia microbiana.

Remoción Microbiana con Aerogel de Óxido de Grafeno:

Dentro de las publicaciones que avalan la capacidad antimicrobiana de los aerogel de GO se explican diversos mecanismos de acción, de naturaleza química y física, que actúan de forma sinérgica (Tang, y otros, 2007). Estos son los bordes afilados del GO que interfieren con la actividad fisiológica de la bacteria, el estrés oxidativo provocado por las especies de oxígeno reactivas y la peroxidación de lípidos, entre otros mecanismos. (Kang, Pinault, Pfefferle, & Elimelech, 2007).

Se han reportado investigaciones en donde los GO y sus derivados pueden inhibir el crecimiento de bacterias y que poseen una mínima citotoxicidad disminuyendo la actividad metabólica de la célula, respectivamente. Además, por medio de un método de conteo de colonias se ha medido la viabilidad antimicrobiana la cual disminuye la viabilidad de los microorganismos. Las muestras han sido analizadas por un microscopio electrónico de transmisión (TEM) con lo que se ha comprobado que la membrana celular fue severamente destruida y que el citoplasma fluyó hacia afuera (Narayan, Berry, & Brigmon, 2005).

De esta manera se ha buscado entender de forma más profunda el mecanismo antimicrobiano de aerogel de Óxido de Grafeno dispersos en agua, por medio de una comparación de la actividad en condiciones similares a las de otros materiales, en donde el aerogel de GO mostró la más alta actividad antimicrobiana y a medida que se aumentan las concentraciones y el tiempo de incubación, mayor era la pérdida de viabilidad de las bacterias. Los resultados sugirieron que la acción antimicrobiana está contribuida por el daño que provoca el contacto directo de las nanoláminas del aerogel de GO con la membrana celular (comprobado mediante SEM) y por estrés oxidativo (Akhavan, Ghaderi, & Esfandiar, 2011).

Tabla 5.*Métodos de remoción de microorganismos.*

Método	Microorganismos removidos	Capacidad de adsorción
Tratamientos térmicos (calentamiento)	<ul style="list-style-type: none"> • Salmonella Shigella • Coliformes fecales 3.8×10^6 a 1.6 NMP 	92% de la concentración microbiana (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2003)
Luz ultravioleta (UV)	<ul style="list-style-type: none"> • Coliformes Fecales 	99,92 % (Sanchez, Villalobos, Gutierrez, & Caldera, 2012)
Ozonación	<ul style="list-style-type: none"> • Poliomieltis • Cryptosporidium • Giardia 	99.99 % de inactivación del patógeno (Block, 1977).
Cloración	<ul style="list-style-type: none"> • coliformes totales • Escherichia coli 	100% (Naydú, y otros, 2010).
Aerogeles de Óxido		
Grafeno	<ul style="list-style-type: none"> • Escherichia coli 	98,5 % (Hu W., 2010)

Realizada la comparación entre los métodos de eliminación microbiana presente en agua se comprobó cuantitativamente a través de los respectivos valores de eficiencia que técnicas convencionales como la cloración y el uso de luz ultravioleta (UV) presentan mejores resultados respecto al uso de aerogeles de GO, aunque sus efectos en la eliminación microbiana son similares. Adicional a ello los métodos tradicionales son técnicas más sencillas en su elaboración y mecanismo de acción en comparación del AGO y en el mismo sentido los estudios revisados evidenciaron la eliminación de un grupo más grande de microorganismos por parte de los métodos tradicionales que los microorganismos eliminados experimentalmente por el uso de AGO.

6.4 Remoción de colorantes presentes en agua

Remoción de colorantes con Aerogeles de Óxido de Grafeno:

El óxido de grafeno (GO), un grafeno funcionalizado, tiene grupos cargados negativamente en la superficie para interactuar con colorantes y pigmentos. Sin embargo, las desventajas de GO incluyen la recuperación difícil después del uso y el correcto apilado de sus hojas. El entrecruzamiento de las hojas de GO forma la estructura del Óxido de grafeno tridimensional (GOA) mediante enlaces de hidrógeno, interacciones electrostáticas y enlaces π - π , que inhiben la disolución de las hojas de GO en agua. Debido a la gran superficie, la estructura porosa y los grupos funcionales en la superficie, el GOA podría considerarse un buen adsorbente para la eliminación de contaminantes del agua.

Para evaluar la capacidad de absorción de colorantes en agua en presencia de GOA se estudiaron los efectos del tiempo de contacto, el pH y la concentración inicial de colorantes como azul de metileno y naranja de metilo donde se añadió adsorbente a la solución de colorante en condiciones de agitación. La concentración de colorante en la solución se midió mediante espectrofotómetro UV-Vis. Se aplicaron los modelos de isotermas de Langmuir (1) y Freundlich (2) para estudiar los datos de adsorción,

Las capacidades de adsorción de azul de metileno (MB), naranja de metilo (MO) se vieron afectadas cuando se aumentó el pH inicial debido a las formas de carga de las estructuras de tinte y los grupos funcionales en la superficie de GOA (Kang, Jang, Huh, & Rethinasabapathy, 2017). La curva de adsorción de MB de GOA aumentó debido a la reducción de la competencia entre H^+ y MB. Se incrementó el número de grupos cargados negativamente en la superficie de GOA, se incrementó la capacidad de adsorción. Para el MO, la repulsión electrostática entre la superficie de GOA cargada negativamente y el MO aniónico aumentó cuando se aumentó el pH, por lo que la

capacidad de adsorción de GOA disminuyó (Kang, Jang, Huh, & Rethinasabapathy, 2017).

Este estudio dio como resultados que los tintes MB, MO con las moléculas grandes limitaban el proceso de difusión a los sitios de adsorción en la estructura GOA y adicionalmente que las hojas de GO se reticularon entre sí para formar una estructura deGOA con un tamaño de poro de alrededor de 50-150 μm . Las capacidades máximas de adsorción de GOA para MB y MO se calcularon en 480,76 y 55,56 mg/g, respectivamente.(Li, Hu, & Sun, 2016).

Tabla 6.

Métodos de remoción de colorantes.

Métodos	Colorantes removidos	Capacidad de remoción
Tratamientos físicos	Colorantes ácidos	90-98% (Barrios, Restrepo, Agudelo, & Cardona Gallo, 2014).
Tratamientos Químicos	Colorantes Azoicos (Martinez, y otros, 2010) (Benkhaya, Rabet, & Harfi, 2020),	80-90% (Barrios, Restrepo, Agudelo, & Cardona Gallo, 2014)
Tratamientos Bilógicos	Colorantes reactivos (Monoclorotriazina, Vinyulfónicos, Diclorotriazina) (Cordova Ruiz, 2016).	30% (Vilaseca, López Grimau, Gutiérrez Bouzán, & Crespi, 2015).
Aplicación de Aerogeles de Óxido de grafeno	Azul de metileno (MB) Naranja de metilo (MO) (Ding, Tian, Li, & Wang, 2019)	MB: 98,39% MO:78.78% (Ding, Tian, Li, & Wang, 2019)

Efectuada la revisión para tratamiento de efluentes contaminados por colorantes consultados en diversas investigaciones se encuentran métodos convencionales entre los cuales se destacan métodos físicos que presentan capacidad de adsorción entre el 90% y 98 %, valores superiores a los obtenidos por los GOA que presentan capacidades de remoción para el Azul de

Metileno(MB) y Naranja de Metllo (MO) del 98,39% y 78.78% respectivamente, con el adicional de que este material puede ser reutilizado hasta en 8 ciclos manteniendo su capacidad de remoción.

Esto último es de suma importancia ya que genera un aprovechamiento/mayor rendimiento por parte del GOA que se refleja en los costos del proceso generando ahorros debido al tiempo de vida útil que presenta.

6.5 Desalinización de agua

Desalinización de agua con Aerogeles de Óxido de Grafeno:

Gran parte de la capacidad actual de desalinización a escala industrial en todo el mundo utiliza procesos de membrana impulsados por presión. Para ello, las membranas deben ser suficientemente estables para manejar altas presiones (presión osmótica de 27 bar para el agua de mar oceánica (Helfer, Lemckert, & Anissimov, 2014). También deben serlo suficientemente resistentes para sobrevivir a la abrasión por altos índices de flujo, y permitir una alta permeación de agua y un alto rechazo de sal. Este exigente conjunto de parámetros presenta un gran esfuerzo en el desarrollo del material, particularmente en lo que respecta a la capa activa, que es tanto el corazón del proceso como la más afectada por el desgaste (Johnson & Hilal, 2015).

Los materiales a base de grafeno, particularmente GO, son muy prometedores para estas aplicaciones debido a su alta resistencia mecánica, facilidad de funcionalización, fácil incorporación a otras membranas y, para las formas oxidadas, un alto grado de hidrofiliidad (Johnson & Hilal, 2015).

Un factor importante en el proceso de desalinización es la capacidad de la membrana para rechazar pequeños iones hidratados, sobre todo Na^+ . Sin embargo, para las membranas que dependen de los canales entre las plaquetas de GO, el tamaño del espacio de las capas intermedias

entre las plaquetas es insuficiente para eliminar estos iones pequeños, esto contrasta con un espaciado máximo necesario entre las capas GO de 0,7 nm para eliminar el NaCl durante los procesos de desalinización (Mi, 2014).

Este amplio espacio es mayor que el encontrado en las membranas recién fabricadas y se debe al hinchamiento de las estructuras GO durante la hidratación (Joshi, y otros, 2014). Como consecuencia, se han hecho esfuerzos para crear membranas usando GO donde se reduzca la hinchazón y, por lo tanto, reducir el espaciado expandido entre capas.

De esta manera las diferentes investigaciones han requerido reducir la hinchazón del material al ponerse en contacto con el agua mediante un proceso de funcionalización empleando reticuladores, de esta forma el rechazo de sal se puede mantener a un nivel alto a costa de la permeabilidad al agua (Fathizadeh, y otros, 2019).

Tabla 7.

Métodos de desalinización.

Métodos	Características del método	Capacidad de Remoción
Osmosis Inversa	<ul style="list-style-type: none"> Método sencillo y gran rendimiento energético. 	95-98% (Kim, y otros, 2018).
	<ul style="list-style-type: none"> El espacio que estas ocupan es mucho menor con respecto a las instalaciones térmicas. 	
	<ul style="list-style-type: none"> No se tiene que recurrir a un calentamiento ni a cambios de fase. 	

Aplicación de Aerogel de GO	<ul style="list-style-type: none"> • Alta resistencia mecánica. • Alto grado de hidrofiliidad • Resistencia a la abrasión por altos índices de flujo. • Las membranas usadas en la osmosis inversa con GO obtienen un incremento en su vida útil. 	98,5% (Johnson & Hilal, 2021)
------------------------------------	---	-------------------------------

Realizada la revisión de artículos se destaca la aplicación de GOA con porcentajes de remoción de iones de sal del 98,5 % presentando propiedades como resistencia a la abrasión por altos índices de flujos y una vida útil mayor en comparación con las membranas tradicionales, que exhiben porcentajes de remoción de iones de sal entre el 95% y 98%, la osmosis inversa con membranas tradicionales presenta un desgaste por las altas presiones del proceso que genera costos por mantenimiento de las mismas, ocasionando paradas de planta y pérdida de tiempo, esto demuestra que los GOA prometen ser un buen material para la adsorción de estos iones. Adicional a esto se puede obtener una reducción en el costo energético del proceso empleando membranas de GOA ya que a las mismas condiciones de presión se obtienen mayores cantidades de flujos tratados.

7 Conclusiones

De la revisión sistemática se identificó que existe una gran cantidad de información e interés científico en realizar investigaciones y estudios respecto al grafeno, GO y propiamente la síntesis de GOA debido a la diversidad de propiedades que caracterizan este material frente a materiales tradicionales, y su prometedor uso en otras áreas de la ciencia, según lo evidenciado en las diferentes bases de datos consultadas.

Existe variedad de métodos químicos para la síntesis de óxido de grafeno dentro de los cuales se destacan como los más relevantes: el método de Brodie, método de Staudenmaier y el método de Hummers siendo este último el más usado debido a que provoca una mejor homogeneidad en la estructura del GO, lo que también da un rango menor en la variación en las propiedades y no produce CO₂ contaminante.

Dentro de los métodos para la síntesis de GOA se evidenció como propósito de cada uno de ellos la elaboración de una estructura porosa estable con alta presencia de grupos funcionales oxigenados, que permita obtener una capacidad de remoción representativa en relación a la gran área superficial de estas, variando condiciones propias de los procesos como temperatura, tiempo de síntesis, PH, entre otros.

De las diferentes aplicaciones tratadas para la remoción de contaminantes presentes en agua se comprobó que los GOA son prometedores para la eliminación de estos contaminantes y la remediación ambiental debido a que presentan eficiencias de adsorción y de remoción similares y en algunos casos superiores a las registradas en los métodos convencionales, adicionalmente las estructuras a base de GOA cuentan con alta resistencia mecánica, alto grado de hidrofiliidad, fácil recuperación del material después de ser usado, gran área superficial, entre otras.

Por otra parte, la síntesis y producción a gran escala de estos materiales tiene elevado costo y para algunas de sus aplicaciones el espacio interlaminar entre las capas es lo suficientemente grande como para permitir el paso de partículas que se desean remover, por lo tanto, requiere de procesos adicionales para reducir este espacio.

Referencias Bibliográficas

- Akhavan, O., Ghaderi, E., & Esfandiari, A. (2011). Wrapping Bacteria By Graphene Nanosheets for Isolation from Environment, Reactivation by Sonication, and Inactivation by Near-Infrared Irradiation. *Phys Chem*, 6279-6288.
- Ali, I., & Gupta, V. (2006). Advances in water treatment by adsorption technology. *Nature protocols*, 2661-2667.
- Al-Muhtased, S., & Ritter, J. (2003). Preparation and properties of resorcinolformaldehydeorganic and carbon gels. *Advanced Materials*, 15, 101.
- B., P., W., Z., L., L., Q., Z., & S., Z. (2009). Development of polymeric and polymer-based hybrid adsorbents for pollutants removal from waters. *Chemical Engineering Journal*, 1(151), 19-29.
- Bai, M., & C., J. (2015). Preparation of stable aqueous dispersion of edge-oxidized graphene. *Colloids and Surfaces A. Physicochemical*, 59-66.
- Barrios, Z. L., Restrepo, G., Agudelo, L., & Cardona Gallo, S. (2014). Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales.
- Baumann, T., Worsley, M., Han, T., & Statcher, J. (2008). High surface area carbon aerogel monoliths with hierarchical porosity. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354, 3513-3515.
- Benkhaya, S., Rabet, S., & Harfi, A. (2020). Una revisión sobre clasificaciones, síntesis reciente y aplicaciones de tintes textiles.
- Block, J. (1977). *Contribution to the study of disinfection of drinking water by ozone*. Francia: Universidad de Nancy.

- Brownson, D., Kampouris, D., & Banks, C. (2012). Graphene electrochemistry fundamental concepts through to prominent applications. *Chem Soc Rev*, 6944- 6976.
- Bryning, M., Milikie, D., Islam, M., Hough, L., Kikkawa, J., & Yodh, A. (2007). *Adv. Mater*, 661-664.
- Caldwell, A. (1934). *Ind and Eng Chem* "Thermal Conductivity of Silica Aerogel". 658.
- Chen, D. (2012). Graphene Oxide: Preparation, Functionalization, and Electrochemical Applications. *Chem Rev*, 6027-6053.
- Chen, Q., Luo, Z., Hills, C., Xue, G., & Tvrer, M. (2009). Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. *Water Residual*, 2605-2614.
- Choi, W., Lahiri, I., Seelaboyina, R., & Kang, Y. (2010). Synthesis of Graphene and Its Applications. *Critical Reviews In Solid State And Materials Sciences*, 53-71.
- Cordova Ruiz, M. (2016). Estampado con colorantes Reactivos.
- Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal a review. *Bioresource technology*, 1061-1085.
- Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal a review. *Bioresource technology*, 1061-1085.
- Danglad, J., Marfisi, S., Cova, A., & Linero, G. (2013). Partículas hidrofobadas de bagazote de caña de azúcar para el tratamiento de hidrocarburos en agua. *Saber*, 97-103.
- Deng, W., Fang, Q., Zhou, X., Cao, H., & Liu, Z. (2016). *Adv*, 20843-20849.
- Ding, Y., Tian, Z., Li, H., & Wang, X. (2019). Efficient removal of organic dyes using a three-

dimensional graphene aerogel with excellent recycling stability. *New Carbon Materials*, 315-324.

Dreyer, D., Park, S., Bielawski, C., & Ruoff, R. (2010). The chemistry of Graphene oxide. *Chem Soc Rev*, 228-240.

Fang, F., Kong, L., Huang, J., J., W., Zhang, S., Wang, K., . . . Liu, J. (2014). Removal of cobalt ions from aqueous solution by an animation graphene oxide nanocomposite. *Hazard Mater*, 1-10.

Fathizadeh, M., Tien, H., Khivantsev, K., Song, Z., Zhou, F., Yu, M., & Polyamide, Y. (2019). Polyamide/nitrogen-doped graphene oxide quantum dots (N-GOQD) thin film nanocomposite reverse osmosis membranes for high flux desalination. *Desalination*, 125-132.

Franco, C., Martínez, M., Benjumea, P., Patiño, E., & Cortés, F. (2014). Water remediation based on oil adsorption using nanosilicates functionalized with a petroleum vacuum residue. *Adsorption Science & Technology*, 197-207.

G., F., & N., I. (2011). Implicaciones sociales y ambientales del desarrollo de las nanotecnologías en América Latina y el Caribe. México y Curitiba, Brasil. *ReLANSe, IPEN*.

G.K, R. (2011). Graphene and graphene oxide as effective adsorbents toward anionic and cationic dyes. *Journal of Colloid and Interface Science*, 270-277.

Geim, A., & Novoselov, K. (2007). The rise of graphene. *Nat Mater*, 183-191.

Gleiter, H. (1995). Nanostructured materials state of the art and perspectives . *Nanostructured Mater*, 3-14.

Goldwhite, H. (1990). *Química Universitaria*.

Gomez, I. (2012). *Síntesis y caracterización de grafeno químicamente reducido (CRG), empleando técnicas espectroscópicas y microscopía electrónica de barrido*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

H., A., & H., K. (2016). Experimental study on solar-powered adsorption refrigeration cycle with activated alumina and activated carbon as adsorbent. *Case Studies in Thermal Engineering*, 36-46.

Hanzawa, Y., Kaneko, K., Yoshizawa, N., Pekala, R. W., & Dresselhaus, M. S. (1998). The pore structure determination of carbon aerogels. *Journal of the International Adsorption Society*, 4, 187-195.

Helfer, F., Lemckert, C., & Anissimov, Y. (2014). Osmotic power with pressure retarded osmosis: theory, performance and trends-a review. *Membr Sci*, 337-358.

Hu, K., Xie, X., Szkopek, T., & Cerruti, M. (2016). *Chem. Mater*, 1756-1768. Hu, W.

(2010). Graphene-Based Antibacterial Paper. *ACS Nano*, 4317-4323.

Huang, J., Peng, L., Zeng, G., Li, X., Zhao, Y., Liu, L., . . . Chai, Q. (2014). Evaluation of micellar enhanced ultrafiltration for removing methylene blue and cadmium ion simultaneously with mixed surfactants. *Separation and Purification Technology*, 83-89.

Huisman, J., Schouten, G., & Schultz, C. (2006). Biologically produced sulphide for purification of process streams, effluent treatment and recovery of metals in the metal and mining industry. *Hydrometallurgy*, 106-113.

Ikram, R., Mohamed Jan, B., & Ahmad, W. (2020). An overview of industrial scalable production of graphene oxide and analytical approaches for synthesis and characterization. *Journal of*

Materials Research and Technology, 9, 11587-11610.

ITOPF. (04 de 2021). *Evolución de las manchas de petróleo*. Obtenido de <https://www.cetmar.org/documentacion/comportamiento.htm>

J., L. V., A., J. P., & S., M. (2009). Fabrication of graphene-polymer nanocomposites with higher-order three-dimensional architectures. *Advanced Materials*, 21(21), 2180- 2184.

Job , N., Théry, A., Pirard, R., Marien, J., Kocon, L., Rouzaud, J., . . . Pirard, P. (2005). *Carbon*, 2481-2494.

Job, N., They, A., Pirad, R., Marien, J., Kocon, L., Rouzaud, J., . . . Pirard, J. (2005). Carbon aerogels, cryogels and xerogels: Influence of the drying method on the textural properties of porous carbon materials. *Carbon*, 43, 2481-2494.

Job, N., Théry, A., Pirard, R., Marien, J., Kocon, L., Rouzaud, J., . . . Pirard, J. (2005). Síntesis y caracterización de aerogel de carbono en forma de microesferas con potencial aplicación en absorción de gases. *Carbon*, 2481-2494.

Johnson, D., & Hilal, N. (2015). Characterisation and quantification of membrane surface properties using atomic force microscopy: a comprehensive review. *Desalination*, 149-164.

Johnson, D., & Hilal, N. (2021). Can graphene and graphene oxide materials revolutionise desalination processes. *Desalination*, 114852.

Joshi, R., Carbone, P., Wang, C., Kravets, V., Su, Y., Grigorieva, I., . . . Nair, R. (2014). Precise and ultrafast molecular sieving through graphene oxide membranes. *Science*, 752-754.

Kang, S., Jang, S., Huh, Y., & Rethinasabapathy, M. (2017). Carbon Letters. 1-13. Kang, S.,

Pinault, M., Pfefferle, L., & Elimelech, M. (2007). Single-Walled Carbon

Nanotubes Exhibit Strong Antimicrobial Activity. *Langmuir*, 8670-8673.

- Khan, S., Cao, Q., Zheng, Y., Huang, Y., & Zhu, Y. (2008). Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing. *China Environ Pollut*, 686-692.
- Kim, S., Ou, R., Hu, Y., Li, X., Zhang, H., Simon, G., & Wang, H. (2018). Non-swelling graphene oxide-polymer nanocomposite membrane for osmosis desalination. *Journal of Membrane Science*, 47-55.
- Klvana, D., Chaouki, J., Pajonk, G., Klvana, D., Chaouki, J., G, P. A., . . . Lyon, I. (1989). Lerf, A., He, H., Forster, M., Klinowski, J., & Phys, J. (1998). Structure of Graphene Oxide Revisited II. *Chem*, 4477-4482.
- Li, Y., Hu, S., & Sun, J. (2016). *Journal of Experimental Nanoscience*, 1156-1170.
- Malik, S., Vijayaraghavan, A., Erni, R., Ariga, K., Khalakhan, I., & Hill, J. (2010). High purity graphenes prepared by a chemical intercalation method. *Nanoscale*, 2139.
- Martín Sánchez, L. (1996). Preparación, Caracterización y aplicación de aerogel de carbono nanocompuestos con metales como catalizadores y electrocatalizadores de reacciones orgánicas Universitat Autònoma de Barcelona. *Departamento de Química*, 120-235.
- Martinez, C. A., Gonzales Ramirez, C., Coronel Olivares, C., Escalante Lozada, J., CastroRosas, J., & Villagómez Ibarra, J. (2010). Biotecnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil.
- Martínez, E., Cifuentes, M., & Coss, R. (2009). Grafeno: un paso hacia el futuro Mundo Nano. *UNAM*, 15-16.
- Mi, B. (2014). Graphene oxide membranes for ionic and molecular sieving. *Science*, 740-742.

- Narayan, R., Berry, C., & Brigmon, R. (2005). Structural and biological properties of carbon nanotube composite films. *Mater. Sci. Eng*, 123-129.
- Naydú, R. H., Sánchez Garibello, A., Matiz Villamil, A., Salcedo Reyes, J. C., Carrascal Camacho, A. K., & Pedroza Rodriguez, A. M. (2010). Evaluación de tres métodos para la inactivación de coliformes y *Escherichia coli* presentes en agua residual doméstica, empleada para riego. 139-149.
- Novoselov, K., Geim, A., Morozov, S., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S., . . . Firsov, A. (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306, 666.
- Pan, B., Zhang, W., Lv, L., Zhang, Q., & Zheng, S. (2009). Development of polymeric and polymer-based hybrid adsorbents for pollutants removal from waters. *Chemical Engineering Journal*, 19-29.
- Parras, M., Varela, A., Cortés-Gil, R., Boulahya, A., Hernando, A., & González Carbet, J. (2013). The Journal of Physical Chemistry Letters. 2171-2176.
- Pekala, R., Alviso, C., Kong, F., & Hulsey, S. (1992). Aerogels derived from multifunctional organic monomers. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 145, 90-98.
- Petrov, P., & Georgiev, G. (2011). Síntesis de compuestos macroporosos de poli (ácido acrílico)-nanotubos de carbono mediante polimerización frontal en disolventes eutécticos profundos. *Camb*, 5768-5770.
- Pumera, M., Ambrosi, A., Bonanni, A., Chng, E., & Poh, H. (2010). Graphene for electrochemical sensing and biosensing. *Trends Anal Chem*, 954-965.
- Sanchez, M., Villalobos, N., Gutierrez, E., & Caldera, Y. (2012). Diseño de un Equipo de Desinfección por Luz Ultravioleta para el Tratamiento de Aguas Residuales con fines de

Reutilización. *Revista Tecnocientífica URU*, 11-18.

Sciences, T. R. (3 de Noviembre de 2010). *Scientific Background on the Nobel Prize in Physics:*

GRAPHENE, compiled by the Class Physics of the Royal Swedish Academy of Sciences.

Obtenido de Advanced-physicsprize:

<https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/advanced-physicsprize2010.pdf>

Sharma, P. (2013). Removal of Cationic Bye from Aqueous Solution Using Graphene Oxide

Nanosheets: Investigation of Adsorption Parameters. *Chem. Eng. Data*, 151-158.

Soleimani Dorcheh, A., Abbasi, M., & Mater, J. (2008). Aerogel de sílice; síntesis, propiedades y

caracterización. *Technol*, 10-26.

SRL, D. V. (12 de 05 de 2021). *MiningPress*. Obtenido de Enernews:

<http://enernews.com/nota/196273/quema-in-situ-de-derrames-de-petroleo->

Stoller, M., Park, S., Zhu, Y., An, J., & Ruoff, R. S. (2008). Graphene based ultracapacitors. *Nano*

letters, 3498-3502.

Tamon, H., & Ishizaka, H. (2000). Influence of gelation temperature and catalysts on the

mesoporous structure of resorcinol-formaldehyde aerogels. *Journal of Colloid and Interface*

Science, 223, 305-307.

Tamon, H., Ishizaka, H., Araki, T., & Okazaki, M. (1998). Control of mesoporous structure of

organic and carbon aerogels. *Carbon*, 36, 1257-1262.

Tamon, H., Ishizaka, H., Mikami, M., & Okazaki, M. (1997). Porous Structure of organic and

carbon aerogels synthesized by sol-gel polycondensation of resorcinol with formaldehyde.

Carbon, 35, 791-796.

Tang, Y. J., Ashcroft, J. M., Chen, D., Min, G., Kim, C.-H., Murkhejee, B., . . . Chen, F. F. (2007).

Charge-associated affects of fullerene derivatives on microbial structural integrity and central metabolism. *Nano Lett*, 754-760.

Taylor, J., & Wiesner, M. (2002). Membranas en AWWA calidad y tratamiento de Agua.

Manual de suministros de Agua comunitaria. *McGraw Hill*, 707-779.

Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. (2003). Wastewater engineering treatment and reuse.

Metcalf and Eddy, 1848.

Terrones, M., Botello, A., Campos, J., López, F., Vega, Y., Rodríguez, J., . . . Terrones,

H. (2010). Graphene and graphite nanoribbons. Morphology, properties, synthesis, defects and applications. *Elsevier, Nano today*, 351-372.

Tewari, P., Hunt, A., & Lofftua, K. (1985). Sinterización de aerogeles. *Lett*, 363-367.

Vickery, J., Patil, A., & Mann, S. (2009). Fabrication of graphene-polymer nanocomposites with

higher-order three-dimensional architectures. *Advanced Materials*, 2180- 2184.

Vilaseca, M., López Grimau, V., Gutiérrez Bouzán, C., & Crespi, M. (2015). Métodos de

eliminación del color en efluentes de tintura Textil. 22-26.

Wang, J., Wang, H., Wang, K., Bin Wang, F., & Xia, X. (2014). Efecto de la relación de aspecto y

los defectos superficiales sobre la actividad fotocatalítica de nanobarras de ZnO. *Sci*, 1-4.

Wang, Y., Yuan, H., Ma, P., Bai, H., Chen, M., Dong, W., . . . Deshmukh, Y. (2017). Superior

Performance of Artificial Nacre Based on Graphene Oxide Nanosheets. *ACS Appl. Mater Interfaces*, 9, 4215-4222.

Yousefj, N. (2019). Environmental performance of graphene-based. *Nature Nanotech*, 107-119.

Zewail, T., & Yousef, N. (2015). Kinetic study of heavy metal ions removal by ion exchange in batch

conical air spouted bed. *Alexandria Engineering Journal*, 83-90.

Zhang, W., Li, Z., Yang, Q., & Phys, J. (2015). *Chem. Lett*, 658-668.

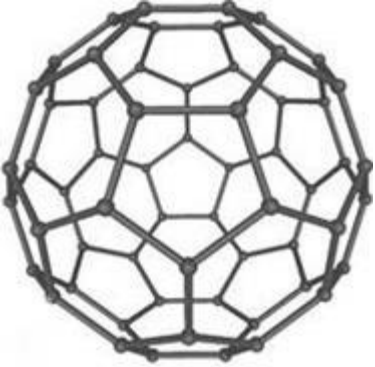
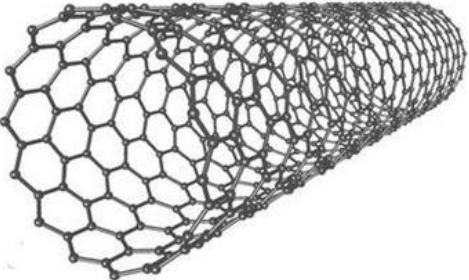
Zhang, Y. L., Guo, L., Xia, H., Chen, Q. D., Feng, J., & Sun, H. D. (2014). Photoreduction of graphene oxides: methods, properties, and applications. *Advanced Optical Materials*, 10-28.

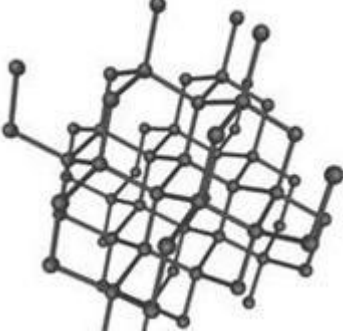
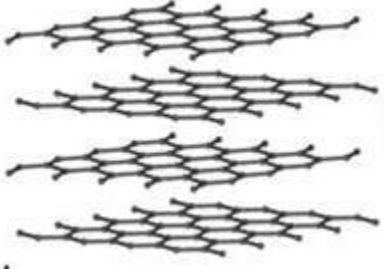
Zhao, Q., Wu, P., Li, B., Lu, Z., & Jiang, E. (2008). *Journal Applied Physics*. 1-5.

Zhu, C., Han, T., Duoss, E., Golobic, A., Kuntz, J., Spadaccini, C., & Worsley, M. A. (2015). Highly compressible 3D periodic graphene aerogel microlattices. *Nature communications*, 6.

Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J., Potts, J., & Ruoff, R. (2010). Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. *Adv Mater*, 3906-3924.

Apéndice A. Tipos de alótopos y propiedades

<p style="text-align: center;">FULLERENO</p> 	<p>Es una estructura cero dimensional (0D) con un diámetro aproximado de 1.0 nanómetros, cuyo arreglo de átomos de carbono se asemeja a un balón de fútbol. Fue descubierto en 1985 pero sólo hasta 1990 se diseñó una ruta de sintética para su producción en masa, desde ese momento ha sido ampliamente estudiado (N. Job, y otros, 2005).</p>
<p style="text-align: center;">NANOTUBOS</p> 	<p>Los nanotubos de carbono, llamados CNT, son estructuras mono dimensionales (1D) debido a que la longitud se sale de la escala de los 100 nanómetros alcanzando dimensiones de varias micras, pero manteniendo su diámetro a escala nanométrica. Fueron descubiertos en 1991 como un subproducto de la síntesis del fullereno, aunque su separación y purificación ha sido un problema sobre todo cuando se produce en grandes cantidades ya que no son solubles. Sin embargo, han mostrado tener excelentes propiedades mecánicas y eléctricas, por lo tanto, se consideran como candidatos prometedores en una gran cantidad de aplicaciones, especialmente en electrónica (H. Tamon, y otros, 2007) (N. Job, y otros, 2005)</p>
<p style="text-align: center;">DIAMANTE</p>	<p>En este alótropo los átomos de carbono se encuentran en estado de hibridación sp^3, presenta una esteoquímica tetraédrica y una estructura cúbica centrada en las caras.</p> <p>La estructura compacta del diamante le</p>

	<p>confiere sus excelentes propiedades. Es el más duro de todos los materiales y el que presenta la mayor conductividad térmica. Es el material más perfectamente transparente y tiene una de las resistividades eléctricas más altas; bajo condiciones específicas puede ser un semiconductor excepcional (N. Job, y otros, 2008).</p>
<p style="text-align: center;">GRAFITO</p> 	<p>El grafito es un material que se caracteriza porque sus átomos de carbono, que presentan hibridación sp^2, constituyen una red hexagonal plana y cuya superposición define una estructura laminar. Cada átomo de carbono utiliza sus orbitales híbridos para formar tres enlaces covalentes coplanares con otros tres átomos de carbono vecinos. El orbital p no hibridado de cada átomo de carbono se orienta perpendicularmente a la red o capa e interacciona con todos los demás átomos a través de un mecanismo tipo π. La distancia entre cada capa, plano basal o lámina es de aproximadamente $3,35 \text{ \AA}$, lo que indica que el enlace entre ellas es muy débil ya que es originado fundamentalmente por las fuerzas de interacción de Van der Waals. Tal configuración da como resultado una gran anisotropía en el cristal, la cual se refleja en sus propiedades. Se utiliza ampliamente en la fabricación de dispositivos electrónicos, de semiconductores y como lubricante (N. Job, y otros, 2008) (H. Ishizaka, y otros, 2009)</p>