

1-1-2019

## Uso del óxido de grafeno como adsorbente en la remoción de cromo en una matriz acuosa con características de agua residual producto de la actividad de curtido

Hamilton Yesid Páez Pacheco  
*Universidad de La Salle, Bogotá*

Laura Angélica Rincón Castro  
*Universidad de La Salle, Bogotá*

Follow this and additional works at: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria)

---

### Citación recomendada

Páez Pacheco, H. Y., & Rincón Castro, L. A. (2019). Uso del óxido de grafeno como adsorbente en la remoción de cromo en una matriz acuosa con características de agua residual producto de la actividad de curtido. Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/781](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/781)

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Ambiental y Sanitaria by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact [ciencia@lasalle.edu.co](mailto:ciencia@lasalle.edu.co).

USO DEL ÓXIDO DE GRAFENO COMO ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE CROMO  
EN UNA MATRIZ ACUOSA CON CARÁCTERÍSTICAS DE AGUA RESIDUAL  
PRODUCTO DE LA ACTIVIDAD DE CURTIDO

HAMILTON YESID PÁEZ PACHECO  
LAURA ANGÉLICA RINCÓN CASTRO

UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
PROYECTO DE GRADO  
BOGOTÁ D.C, 2019

USO DEL ÓXIDO DE GRAFENO COMO ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE CROMO  
EN UNA MATRIZ ACUOSA CON CARÁCTERÍSTICAS DE AGUA RESIDUAL  
PRODUCTO DE LA ACTIVIDAD DE CURTIDO

HAMILTON YESID PÁEZ PACHECO  
LAURA ANGÉLICA RINCÓN CASTRO

Proyecto de Grado para obtener el título de  
Ingeniera Ambiental y Sanitario

DIRECTOR:

Químico Oscar Arturo Gerena Rojas Dr. Sc.

UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
PROYECTO DE GRADO  
BOGOTÁ D.C, 2019

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

Víctor Marulanda

---

Jesús Torres Ortega

---

Oscar Arturo Gerena Rojas  
Director

**Bogotá, Enero de 2019.**

## Contenido

RESUMEN EJECUTIVO .....	1
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	2
INTRODUCCION.....	5
OBJETIVOS.....	6
OBJETIVO GENERAL.....	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
MARCO DE REFERENCIA.....	7
MARCO TEÓRICO.....	7
GENERALIDADES DEL CROMO .....	7
CONTAMINACIÓN CAUSADA POR CROMO.....	8
CONTAMINACIÓN DEL RÍO TUNJUELO PRODUCTO DE VERTIMIENTOS QUE CONTIENEN CROMO .....	8
MÉTODOS FÍSICOS PARA LA REMOCIÓN DE CROMO EN EL AGUA.....	10
GRAFENO.....	13
ÓXIDO DE GRAFENO.....	16
MINITAB® .....	20
METODOLOGÍA .....	21
ÓXIDO DE GRAFENO.....	23
RESULTADOS .....	25
MINITAB® .....	27
R STUDIO .....	31
CONCLUSIONES.....	34
RECOMENDACIONES.....	35
BIBLIOGRAFÍA.....	37

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Métodos de remediación del Cromo.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 2. Propiedades del grafeno.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 3. Tabla de propiedades del GO GRENOX. ....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 4. Variables medidas durante el estudio .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 5. Variables por evaluar en el ensayo. ....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 6. Relación de remoción de Cromo con el Óxido de grafeno .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 7 Resumen de resultados .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 8. Resumen del modelo matemático .....</i>	<i>33</i>

## LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Hoja de óxido de grafeno. _____</i>	<i>17</i>
<i>Ilustración 2. Descripción gráfica del procedimiento llevado a cabo en el laboratorio. _____</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 3. Presentación del GO en dispersión. _____</i>	<i>24</i>

## RESUMEN EJECUTIVO

El desarrollo económico en países latinoamericanos ha traído consigo la industrialización de diferentes procesos necesarios que permiten mayor competitividad en el mercado y que permiten brindar un proceso eficiente y sostenible con el medio ambiente. Tal es el caso de la producción de pieles en el país, en donde, así como muchas empresas han podido mejorar los procesos al cambiar el uso de sustancias que son tóxicas, también es posible cambiar metodologías que van encaminadas al saneamiento de vertimientos hechos por esta industria, que no solo mejorarían la calidad del efluente al cual se realiza la disposición sino también la calidad de vida de la población cercana con el cauce.

Esta investigación determinó la eficiencia de remoción de Cromo en una matriz acuosa, usando un material novedoso basado en nano placas de grafeno denominado óxido de grafeno (GO). este material se obtiene comercialmente y su evaluación se realiza en una matriz acuosa sintética con concentraciones iniciales específicas de Cromo<sup>+6</sup>. Los ensayos son realizados con una réplica y los resultados se analizan por medio de un Software estadístico especializado denominado MINITAB®, que evaluó el comportamiento de variables de entrada (Tiempo de contacto, pH, masa de Cromo removida/masa de GO utilizado y masa de óxido de grafeno) y permitió establecer la combinación de variables es más adecuada para la remoción de cromo en el sistema de estudio, adicional a esto se plantea el uso de un modelo lineal, que busca definir la cantidad de GO adecuada para la disminución de la concentración de Cromo. Adicional a esto, se evalúan valores teóricos y experimentales que pretenden comparar el modelo matemático utilizado y la metodología empleada en el laboratorio por medio de la herramienta R STUDIO.

El análisis estadístico de los resultados obtenidos indica que, a un pH de 8,00, un tiempo de 90 minutos y una concentración de GO de 50 mg/L, son las mejores condiciones de uso del óxido de grafeno, encontrando una capacidad máxima de remoción de 2,03 mg Cr /mg de GO.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Actividad antropogénica:** Acción o intervención realizada por el ser humano sobre la faz de la tierra. (Vazquez, 2011)

**Adsorción:** Atracción y retención que realiza un cuerpo en su superficie de iones, átomos o moléculas que pertenecen a un cuerpo diferente. (Porto & Gardey, 2015)

**Agua residual industrial:** Desechos líquidos provenientes de las actividades industriales. (Cadagua. , 2018 )

**Caracterización de agua residual:** Determinación de la cantidad y características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

**Carga contaminante:** Es el producto de la concentración másica promedio de una sustancia por el caudal volumétrico promedio del líquido que la contiene determinado en el mismo sitio; en un vertimiento se expresa en kilogramos por día. (kg/d). (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

**Capacidad de asimilación y dilución:** Capacidad de un cuerpo de agua para aceptar y degradar sustancias, elementos o formas de energía, a través de procesos naturales, físicos, químicos o biológicos sin que se afecten los criterios de calidad e impidan los usos asignados. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)



**Concentración de una sustancia, elemento o compuesto en un líquido:** La relación existente entre su masa y el volumen del líquido que lo contiene. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

**Contaminación Hídrica:** Acto de verter algún material, ya sea sólido o líquido, al agua modificando su composición química y su calidad. (Bioenciclopedia, 2015)

**Curtiembre:** Refiere al sitio donde se lleva a cabo el proceso que permite transformar la piel de un animal muerto en cuero. (Porto J. P., 2017)

**Intoxicación:** Entrada de un tóxico al cuerpo humano en cantidad suficiente como para producir un daño. (Díaz, 2016).

**Intoxicación por cromo:** La acción tóxica del cromo se produce por acción cáustica directa, interferencia con el metabolismo o duplicación de los ácidos nucleicos. (Mosquera J. T., 2015)

**Objetivo de calidad:** Conjunto de parámetros que se utilizan para definir la idoneidad del recurso hídrico para un determinado uso. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

**Óxidos de grafeno:** Lámina de grafeno funcionalizada con distintos grupos oxigenados. (González, 2016)

**Punto de control del vertimiento:** Lugar técnicamente definido y acondicionado para la toma de muestras de las aguas residuales de los usuarios de la autoridad ambiental o de los suscriptores y/o usuarios del prestador del servicio público domiciliario de alcantarillado, localizado entre el sistema de tratamiento y el punto de descarga. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial , 2010 )

**Punto de descarga:** Sitio o lugar donde se realiza un vertimiento al cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial , 2010 )

**Sonicación:** Aplicación de energía sonora para agitar partículas de una muestra, utilizada comúnmente en nanotecnología para dispersar uniformemente nanopartículas en líquidos.

(Peshkovsky, A.S., Peshkovsky, S.L., Bystryak, S., 2013)

**Sustancia de interés sanitario:** Sustancias químicas, elementos o compuestos que pueden causar daños o son tóxicos para la salud humana o cualquier forma de vida acuática. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2016)

**Toxicidad:** La propiedad que tiene una sustancia, elemento o compuesto, de causar daños en la salud humana o la muerte de un organismo vivo. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial , 2010 )

**Toxicidad aguda:** La propiedad de una sustancia, elemento, compuesto, desecho, o factor ambiental, de causar efecto letal u otro efecto nocivo en cuatro (4) días o menos a los organismos utilizados para el bioensayo acuático. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial , 2010 )

**Toxicidad crónica:** La propiedad de una sustancia, elemento, compuesto, desecho o factor ambiental, de causar cambios en el apetito, crecimiento, metabolismo, reproducción, movilidad o la muerte o producir mutaciones después de cuatro (4) días a los organismos utilizados por el bioensayo acuático. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial , 2010 )

**Vertimiento:** Descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2016)

**Vertimiento puntual:** El que se realiza a partir de un medio de conducción, del cual se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2016)

## INTRODUCCION

El objeto de esta investigación radica en examinar una alternativa que pueda ser utilizada en el tratamiento terciario de aguas residuales, con el objetivo de reducir la concentración de Cromo. El tratamiento de agua en diferentes actividades industriales es un factor relevante en el cuidado del medio ambiente, esta labor ha sido regulada por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible mediante la Resolución 0631/2015, por la cual, se establecen los valores máximos permisibles de concentración de distintas especies químicas contaminantes presentes en los vertimientos, que pueden representar riesgo en la salud humana o para las especies que se encuentran en contacto con el efluente.

El tratamiento convencional de vertimientos producto de la actividad de curtido incluyen un tratamiento preliminar en el que se eliminan los sólidos y materiales gruesos del agua antes de ser tratados de manera que no afecten las operaciones siguientes. Tratamiento primario en el que se usa la coagulación, floculación y sedimentación para la remoción de materia orgánica, sulfuros y cromo. Tratamiento secundario emplea lodos activados que permiten reducir aún más la materia orgánica que poseen los residuos y, por último, un tratamiento terciario que permite reducir contaminantes específicos, patógenos y parásitos restantes. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2016). El estudio se aborda, siguiendo una metodología que pretende en primer lugar describir el compuesto utilizado que es el óxido de grafeno, y segundo lugar, caracterizar la muestra acuosa en la cual se realiza el estudio. Para posterior a esto, realizar un análisis de los resultados obtenidos a través de las variables que previamente fueron escogidas como las más significativas frente a un cambio entre una concentración inicial alta de Cromo, y una reducción importante al final del proceso de dicho componente.

Una disminución en la concentración de Cromo en los vertimientos generados en el proceso de curtido conlleva una mejora significativa en la calidad de las aguas del río Tunjuelito, actual receptor de los desechos líquidos realizados de estas industrias ubicadas en el barrio San Benito. Esta mejora beneficia de manera directa a los industriales del sector y también a las personas que se ubican en la rivera de este cuerpo acuoso.

En este sentido, el beneficio será en dos sentidos principales, la salud de la población mencionada y la economía de los industriales del sector. No se puede dejar de lado que, una mejora en las condiciones de operación conlleva consigo el fortalecimiento de la capacidad productiva y la estabilización en la generación de empleo, esto es muy importante pues de esta actividad según datos de la SDA, a junio de 2010, “en el barrio San Benito, se halla el 90% de las curtiembres de la ciudad de Bogotá, representada en 245 empresas.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Evaluar el uso de Óxido de Grafeno como adsorbente en la remoción de Cromo en una matriz acuosa con características de agua residual producto de la actividad de curtido.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Constituir la base bibliográfica soporte de la investigación
- Identificar las variables de operación para el diseño experimental
- Establecer el método analítico para la cuantificación del Cromo
- Evaluar las variables seleccionadas en el diseño experimental como un conjunto de factores que permiten remover con mayor eficiencia Cromo de la muestra.

## MARCO DE REFERENCIA

### MARCO TEÓRICO

#### GENERALIDADES DEL CROMO

El cromo es un metal, clasificado en el sistema periódico dentro del grupo de elementos de transición interna; en su forma elemental es duro y quebradizo, presenta una coloración blanca y el respectivo brillo que caracteriza a los metales, es suave y dúctil, por su naturaleza se emplea en aleaciones resistentes al trabajo a altas temperaturas y al ataque de agentes químicos, en particular es ampliamente usado en la producción de acero inoxidable. Presenta tres estados de oxidación (+2, +3 y +6) cuando forma compuestos; tiene una gran cantidad de aplicaciones en diversos campos, se usan para colorear el vidrio, el curtido de cuero, la fabricación de catalizadores, en cintas magnéticas, pigmentos textiles, baterías, fungicidas, entre otros (Lenntech.es, 2017).

El Cr(VI) predomina bajo condiciones de oxidación mientras que el Cr(III) se encuentra bajo condiciones de reducción. En soluciones acuosas el Cr(VI) puede formar otras especies como lo son:  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$ ,  $\text{CrO}_4^{-2}$ ,  $\text{H}_2\text{CrO}_4$  y  $\text{HCrO}_4^-$ . Esta distribución depende del pH de la solución. El total de la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$ , depende de la cantidad de compuestos reductores u oxidantes en la muestra, el potencial de Reducción y la cinética de reacción. Si el pH de la solución se encuentra sobre 7,00,  $\text{CrO}_4^{-2}$  es el único ion independiente existente en la concentración total de Cr(VI), mientras que el ion  $\text{HCrO}_4^{-2}$  predomina en especies cuyo pH se encuentra entre 1-6. (Barrera - Diaz, Lugo, & Bilyeu, 2012)

#### TOXICIDAD DEL CROMO

El Cromo es necesario para el normal metabolismo de azúcares, lípidos y proteínas en mamíferos convirtiéndolo en micronutriente esencial para animales y seres humanos. Se desconoce la

cantidad de Cromo necesario en rutas metabólicas para plantas y microorganismos, sin embargo, altas cantidades de este metal son tóxicas. El Cr(VI) se considera altamente tóxico debido a que causa enfermedades en el ser humano y animales, como diarrea, úlceras e irritación en ojos y en la piel, disfunción renal y carcinoma en pulmones. (Costa, 2003; Mohanty et al., 2005). Una dosis alta de Cr(VI) puede causar muerte en humanos y animales.

El mecanismo principal por el cual el Cromo (VI) ingresa a las células eucariotas y procariotas es por medio de difusión a través de la membrana celular, una reducción del Cr(VI) en la célula da lugar a radicales libres que pueden causar daños directos en el ADN de la célula y ocasionar otros efectos tóxicos. (Arslan et al., 1987; Kadiiska et al., 1994; Liu et al., 1995)

#### CONTAMINACIÓN CAUSADA POR CROMO

El Cromo tiene gran cantidad de usos en la industria, relacionadas con sus características anticorrosivas. Se utiliza en industrias metalúrgicas, preservación de madera, producción de pinturas y pigmentos entre otros. (Kamaludeen, Baral, & Lu, 2006). Las curtiembres, son una de las tantas industrias que utilizan Cromo. Aproximadamente se generan 40 millones de Toneladas en desechos por las curtiembres alrededor del mundo. Desechos que son eliminados por las industrias en el suelo o en el agua sin tratamiento requerido ocasionando contaminación grave en tierras utilizadas para agricultura y en cuerpos de agua. (Megharaj, 2003)

#### CONTAMINACIÓN DEL RÍO TUNJUELO PRODUCTO DE VERTIMIENTOS QUE CONTIENEN CROMO

La observación de las curtiembres inicialmente revela que las empresas no cumplen con los requerimientos técnicos de construcción industrial. Durante muchos años los procesos productivos en curtiembres se han trabajado en fábricas improvisadas y la mayoría de ellas son casas adaptadas donde, en un mismo lugar se realiza todo el proceso sin la infraestructura

adecuada y donde el manejo de los residuos sólidos y vertimientos líquidos no se tuvo en cuenta desde el comienzo ya que muchos de sus propietarios no conocían las normas y las implicaciones de estos en el medio ambiente (Caracol Radio, 2018). Las empresas, en su mayoría son de carácter familiar. Sólo cerca del 20% posee un grado de mecanización. (Daza,2012). La gran mayoría de las empresas no aplica dentro de sus procesos productivos tecnologías de producción limpia, ni maquinaria tecnificada (Revista Virtual Pro, 2007).

El proceso de transformación de las pieles en cuero se caracteriza por un excesivo consumo de agua; en los países en vías de desarrollo se llega a alcanzar un valor de  $100 \text{ m}^3$  por tonelada de piel procesada. De otra parte, se emplean 442 kg de productos químicos por cada tonelada de piel procesada, la sección de mayor consumo es la de curtido equivalente a un 42% del proceso. De la generación total de residuos, que es de 696 kg por tonelada, el 21% de dichos residuos contiene cromo. (Secretaria Distrital de Ambiente, 2016)

### *TRATAMIENTO DE AGUA QUE CONTIENE CROMO*

El tratamiento fisicoquímico de efluentes que contienen cromo VI, frecuentemente consta de dos etapas. En la primera, el cromo (VI) es reducido a cromo (III) mediante el empleo de agentes químicos como sulfato de Hierro (II) ( $\text{FeSO}_4$ ), cloruro de hierro (II) ( $\text{FeCl}_2$ ), bisulfito sódico ( $\text{NaHSO}_3$ ) o dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ); en la segunda etapa, el Cromo (III) es precipitado como hidróxido de cromo ( $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ) u óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) a pH 8. (Remtavares, 2015)

Dicho tratamiento en cualquiera de sus etapas mencionadas conduce a la formación de lodos que deben ser sometidos a diferentes tratamientos a fin de lograr una disposición adecuada. Estos tratamientos incluyen la deshidratación mediante secado simple o con lechos de secado a fin de disminuir su volumen y el costo de procesamiento. También es necesario tratar los olores que puedan generarse por medio de cal hidratada aplicada sobre el área donde se está realizando el

secado. Es posible aprovechar los residuos obtenidos solo si la calidad del producto final es apropiada en materia de composición para su posterior uso, de lo contrario, es necesario disponer como residuo peligroso. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2016)

Es importante recalcar, que la remediación de Cromo como compuesto independientemente de su estado de oxidación, es posible a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos. Sin embargo, los compuestos del Cr(VI) por sus características oxidantes pueden ser fácilmente reducidos a Cr(III). En la Tabla 1. se enlista algunos de los métodos comúnmente utilizados para remediar contaminación por Cromo.

*Tabla 1. Métodos de remediación del Cromo*

Métodos Físicos	Reducción Química	Biorremediación
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adsorción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ácido sulfhídrico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biosorción</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intercambio iónico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ditionito de sodio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biotransformación</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtración con membrana</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disulfito de sodio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bioacumulación</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Osmosis inversa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disulfito de calcio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biomineralización</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carbón Activado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fotocatálisis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitación extracelular</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electrodiálisis</li> </ul>		

Obtenido de (Secretaría Distrital de Ambiente, 2016)

## MÉTODOS FÍSICOS PARA LA REMOCIÓN DE CROMO EN EL AGUA

Las técnicas como adsorción, electrodiálisis, filtración por membrana entre otros, son algunos de los métodos físicos para remover Cromo.



## *ADSORCIÓN*

La adsorción se define como la concentración de una sustancia sobre la superficie de un sólido. Esta adsorción se debe a la presencia de fuerzas intermoleculares sin balancear, de las moléculas que se encuentran en la superficie de la sustancia, por lo cual permite la atracción de dichas moléculas al entrar en contacto. (Trejo, 2013)

**Adsorción física:** Se produce por interacciones débiles entre el adsorbente y adsorbato del tipo Van der Waals, dipolo-dipolo, puentes de hidrógeno; Adsorción reversible; Formación de mono o multicapas; Calor de adsorción.

La cantidad de soluto adsorbido es función de la naturaleza y área superficial del adsorbente. A temperatura constante se obtienen isothermas de adsorción que evidencian la cantidad adsorbida en función de la concentración del soluto en equilibrio, representado gráficamente.

La separación de metales pesados tóxicos en el agua con adsorbatos que no generan residuos nocivos para el medio ambiente es una técnica que ha focalizado una buena cantidad de estudios, ya que usualmente, estas sustancias que tienen la capacidad de remover estos elementos son de bajo costo, fáciles de obtener y no representan un tratamiento posterior mayor, debido a que los volúmenes de residuos que se obtienen no son muy grandes. (Shell, 2010)

Se utilizan isothermas para describir este fenómeno, ya que la temperatura tiene un efecto significativo en este proceso. La cantidad de adsorbato enlazado se expresa como una función de la presión o la concentración a una temperatura constante. Entre las isothermas utilizadas para evaluar la adsorción, se destacan la de Langmuir, Freundlich, BET y Kisliuk. (Rodríguez, 2013)

El uso de un adsorbato que pueda ser recuperado fácilmente, mejora la probabilidad de ser utilizado debido a que proporciona una mayor capacidad de inmovilización y una mayor reacción a favor de disminuir la concentración del metal sobre el agua. (Alginate, 2012)

Los adsorbentes poseen en su mayoría, pequeños diámetros en los poros que los componen, estos poseen rangos entre 0.25 y 5 mm. Algunos adsorbentes industriales tienen una alta estabilidad térmica y resistencia a la abrasión. Existen tres tipos de adsorbentes industriales (Rodriguez, 2013):

- Compuestos basados en derivados del carbón. (ejemplo: Óxidos de grafeno, carbón activado)
- Compuestos basados en derivados del oxígeno (Ejemplo: Silica, zeolita)
- Compuestos basados en polímeros.

El fenómeno de adsorción se puede esquematizar en dos etapas, la primera es la migración del adsorbato hacia la superficie del adsorbente y la segunda es su fijación mediante uniones débiles fisisorción La eficiencia de adsorción por parte de la sustancia utilizada para tal fin depende de la concentración del adsorbato en el agua, la temperatura y la polaridad.

Los factores que influyen en la adsorción de compuestos presentes en el agua están dados por las características físicas y químicas de la sustancia, donde los que tienen mayor peso molecular y baja solubilidad, se absorben más fácilmente. Entre mayor sea la cantidad de sustancia contaminante en el agua, mayor cantidad de adsorbente es necesario para su remoción. Si existe la presencia de otros componentes, habrá competencia sobre la superficie de adsorción. Por último, el pH del agua y las características fisicoquímicas del afluente que se esté tratando son importantes para determinar cualquier tratamiento que se requiera para la eliminación de algún tipo de contaminante. (Lentntech, 2017)

## GRAFENO

El grafeno es un nanomaterial bidimensional, consistente en una sola capa de átomos de carbono. A pesar de ser tan fino y ligero, es el material más fuerte que se conoce en la naturaleza, con una existencia 200 veces superior al acero estructural con el mismo espesor. Es elástico, prácticamente transparente y posee una alta conductividad térmica y eléctrica. Además de sus propiedades mecánicas, tiene increíbles propiedades electrónicas, químicas, magnéticas y ópticas (Graphenano nanotechnologies, 2017).

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

### *PROPIEDADES DEL GRAFENO*

Además de su extremada delgadez, lo que le hace ser transparente y al mismo tiempo muy flexible, es uno de los materiales más duros y resistentes. El grafeno también es transcendental por las increíbles propiedades térmicas, electrónicas, ópticas y mecánicas que presenta (Graphenano nanotechnologies, 2017). Estas propiedades junto a la abundancia de carbono en la naturaleza han hecho al grafeno ganarse el sobrenombre de “material del futuro” algunas de sus muchas propiedades son:

*Tabla 2. Propiedades del grafeno.*

Bidimensional	Multiplicador de frecuencias
Ligero	Denso e impermeable
Flexible	Bactericida

---

Duro y resistente	Biocompatible
Transparente	Reacciona con otras sustancias
Conductor eléctrico y térmico	Autorreparable
Soporta la radiación ionizante	

---

Obtenido de (Graphenano nanotechnologies, 2017)

### *OBTENCION DE GRAFENO*

Su obtención en estado libre solo fue posible desde hace unos años, con el descubrimiento en 2004 de Geim y Novoselov, un acontecimiento que de inmediato centralizó la atención de la investigación.

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

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

#### *Síntesis por método físico: método de la cinta Scotch.*

El método tradicional, llamado exfoliación micromecánica, que les valió a los físicos Andre Geim y Kostantin Novoselov para recibir el Premio Nobel en 2010, consiste en obtener grafeno a base de deshojar el grafito con cinta adhesiva. Tras sucesivas pasadas, parte del grafito se va eliminando y se obtienen capas de grafeno de pequeño espesor (Graphenano nanotechnologies, 2017).

### Síntesis por método químico

Como se ha dicho antes, la exfoliación mecánica del grafito es sencilla y de ella se obtiene grafeno de alta calidad, pero no sirve para la producción de grafeno a gran escala. Por ello, se han tenido que desarrollar métodos alternativos de síntesis económicamente viables y que, de igual manera, den lugar a un grafeno de calidad (Graphenano nanotechnologies, 2017).

Estos métodos de síntesis pueden seguir dos estrategias distintas: estrategia descendente y estrategia ascendente. Con las estrategias descendentes, el grafeno se obtiene con la exfoliación de materiales de carbono, normalmente grafito, para obtener láminas de grafeno mediante procesos mecánicos o químicos.

Con las estrategias ascendentes, el grafeno se obtiene a partir de los átomos de carbono generados tras la descomposición de hidrocarburos, generalmente a altas temperaturas. Entre las estrategias ascendentes se destaca la deposición química en fase de vapor (CVD) y el crecimiento epitaxial sobre sustratos.

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

**Grafeno en lámina.** Es de alta calidad y se emplea en campos como la electrónica, la informática o incluso la aeronáutica, donde se requiere obtener un material muy resistente. Su producción es muy costosa.

**Grafeno en polvo.** Se usa en aquellos ámbitos que no requieren de un material de alta calidad. Su proceso de obtención es más barato y permite una mayor producción del producto, pero teniendo que renunciar a gran parte de sus propiedades, ya que es muy complicado obtener monocapas de grafeno.

## ÓXIDO DE GRAFENO

### *OBTENCIÓN*

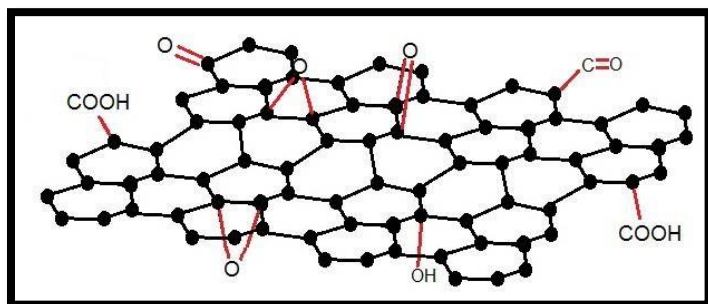
El grafeno puede producirse a partir del grafito por medio de deposición de vapor y métodos mecánicos o químicos (K. E. Whitener and P. E. Sheehan, 2014). El óxido de grafito puede exfoliarse usando un solvente orgánico para formar óxido de grafeno (GO) produciendo diferentes formas de dispersión estables a largo plazo (J. I. Parades, S. Villar-Rodil, A. Martínez-Alonso, and J. M. D. Tascón, 2008).

El óxido de grafeno es conocido como ácido gráfitico, fue preparado por primera vez por el químico británico B.C. Brodie, cuando al agregar Clorato de potasio ( $\text{KClO}_3$ ) a una mezcla de grafito y Ácido Nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), se obtiene así un nuevo compuesto en el cual encuentra carbono, oxígeno e hidrógeno (Contreras, 2015).

Es el producto de la oxidación de grafito está formado por capas de grafeno y tiene una estructura semiplana de hojas de grafeno con varios grupos funcionales oxigenados unidos mediante enlaces covalentes a través de los átomos de oxígeno a la estructura de carbono sobre y debajo del plano basal y en la periferia de las hojas, con un espesor aproximado de 1 nm y dimensiones laterales que varían de entre unos cuantos nanómetros a algunas micras.

En la Ilustración 1; Error! No se encuentra el origen de la referencia. se representa una hoja de rafeno, donde en la periferia y sobre el plano de la hoja aparecen grupos funcionales como carbonilo ( $\text{C=O}$ ), carboxilo ( $\text{COOH}$ ), epoxi ( $\text{C-O-C}$ ) e hidroxilo ( $-\text{OH}$ ). (Contreras, 2015)

*Ilustración 1. Hoja de óxido de grafeno.*



Obtenido de (Contreras, 2015)

El GO y el óxido gráfitico pueden ser producidos por procesos químicos similares, pero por medio de una estructura distinta para cada uno. Varios métodos termales y mecánicos existen para exfoliar grafito a óxido de grafeno, sin embargo, la sonicación del grafito dentro de agua o un medio orgánico son las más comunes para usar debido a la rapidez para obtener el GO en comparación con otros métodos. (N.I. Zaaba, K.L. Foo et al, 2017)

Tiene un área de superficie que le proporciona características electroquímicas, mecánicas y físicas de gran interés. Existen varios tipos de óxidos de grafeno: el óxido de grafeno (GO), óxido de grafeno reducido (RGO) y por último capas de óxido de grafeno (FGO).

Estos materiales tienen óptimas características para la adsorción de contaminantes como materia orgánica y metales pesados que se encuentran en las aguas residuales.

Los resultados que apoyan el uso del grafeno en el proceso de descontaminación señalan que este material tiene afinidad por sustancias tóxicas como el azul de metileno, la rodamina B, la violeta de metileno, o el naranja de metilo que se encuentran en los tintes (Heruzo, 2014), que bajo condiciones de temperatura y pH controladas crea una interacción entre las cargas iónicas de los tintes y las características de la superficie del grafeno. Cuando el grafeno adsorbe alguno de estos componentes se produce variaciones del pH y de las fuerzas iónicas. Concretamente, se ha

reportado una mejoría de retención de los contaminantes con un pH entre 4.0 a 9.0 y a una temperatura entre los 25 a 30°C (Heruzo, 2014).

### *PROPIEDADES*

El óxido de grafeno es muy soluble en agua con ultrasonido o agitación mecánica, así como la característica de ser un material anfifílico, es decir, tienen una parte lipofílica y otra parte hidrofílica, en esta cualidad se asemeja mucho al comportamiento de las sustancias modificadoras de la tensión superficial (Heruzo, 2014)

- Tiene la facilidad de formar enlaces por puentes de hidrógeno debido a su composición química que presenta. Esto podría presentar alteraciones en las propiedades eléctricas, mecánicas y estructurales.
- Las películas de óxido de grafeno presentan propiedades antibacterianas.
- Se ha observado que el GO se ha utilizado como biosensor, debido a las propiedades fluorescentes.

### *ESTUDIOS QUE SOPORTAN EL USO DE ÓXIDO DE GRAFENO PARA REMOVER CROMO EN AGUA*

Sheikhmohammadi et al. (2017) examinaron el uso de óxido de grafeno modificado con 8-hidroxiquinolina en la adsorción de Cromo<sup>+6</sup> en aguas residuales además de esto analizaron la respuesta de la superficie usando el software R para evaluar factores independientes como el pH, tiempo de contacto, concentración de 8-hidroxiquinolina entre otros. Los resultados analizados muestran remociones cercanas al 95%, en condiciones de pH de 6.58, dosis de 8-HQ/GO 98.4 g/L, tiempo de contacto de 178.4 min y una concentración final de Cromo VI de 1mg/L.



Gopalakrishnan et al. (2015) examinaron la remoción de iones de metales pesados en efluentes de la industria farmacéutica donde se encuentra que el óxido de grafeno (GO) disminuye la cantidad de Níquel (II), Plomo (II) y Cromo<sup>+6</sup> presente en el agua, con respecto al Níquel (II) se observa una disminución de la concentración inicial a medida que se añade mayor cantidad de GO donde la concentración utilizada de GO fue de 70 mg/L a un pH de 8 en una muestra de 100 mL.

Zhang et al. (2017) sintetizaron materiales compuestos nanométricos de óxido de grafeno/NiO y examinaron su uso en la remoción de cromo<sup>+6</sup> en disolución por adsorción, se observa una adsorción máxima de 198 mg/g de Cr<sup>+6</sup> la más alta registrada hasta ahora, con un pH de 4 y una temperatura de la muestra de 25° los investigadores encontraron que el pH afecta la interacción entre el adsorbente y el adsorbato, mientras que la temperatura es insignificante en cuanto a la remoción del metal.

He et al. (2017) utilizaron el óxido de grafeno con 3 aminopropiltriethoxysilane (AS - GO) para remover Cromo<sup>+6</sup> de agua residual donde analizaron factores como el pH, concentración inicial de Cromo<sup>+6</sup>, tiempo de contacto, temperatura y aniones que interactúan entre sí dentro de la muestra. obtuvieron valores altos de adsorción por parte del AS - GO con respecto al Cromo<sup>+6</sup> inicial, en el cual la adsorción máxima alcanzada es de 215.2 mg/g a 328°K encontraron que existe una alta relación del pH de la muestra con el resultado obtenido además concluyeron que el uso de AS - GO es exitoso debido a la interacción entre grupos aminos e hidroxilos que permiten la reducción del Cromo<sup>+6</sup> a Cromo Cromo<sup>+3</sup>

Wei Fang, Jiang, Luo, Geng (2018) usaron nanocompuestos de grafeno/SiO<sub>2</sub> para la remoción de Cromo<sup>+6</sup> disuelto en agua donde se prueba la reducción de Cromo<sup>+6</sup> por medio de un nanocompuesto conformado por polipirrol (PPy) y hojas de GO y sílice como variables de

interferencia tomaron: pH, tiempo de contacto, concentración de Cromo<sup>+6</sup>, temperatura, interacción de iones presentes en la muestra y los ciclos de adsorción - desorción del compuesto como resultados encontraron una adsorción máxima de 429.2 mg/g a 298°K en un pH de 2 concluyendo que el mecanismo de remoción envuelve procesos como atracción electrostática, intercambio iónico y reducción de Cromo<sup>+6</sup> a Cromo<sup>+3</sup> donde posteriormente es retenido por la superficie formada entre el grafeno-sílice y el PPy.

C.N. Nupearachchi (2018) evaluó los desarrollos recientes de la capacidad del grafeno para descontaminar aguas residuales y explicar los mecanismos de adsorción hacia el alcance futuro donde utilizo varios compuestos de óxidos de grafeno para la remoción de varios contaminantes en el agua, enfocamos nuestra revisión a la remoción de Cromo<sup>+6</sup> donde el investigador pone a reflujó GO con etilendiamina (ED) usando dimetilformamida (DMF) como solvente para formar GO funcionalizado químicamente reducido donde la eliminación total de Cr se observó a un valor de pH óptimo de 2 donde el adsorbente resultante (ED-DMF-RGO) mostró 92 mg / g de capacidad de eliminación de Cromo<sup>+6</sup> a este pH particular.

#### MINITAB®

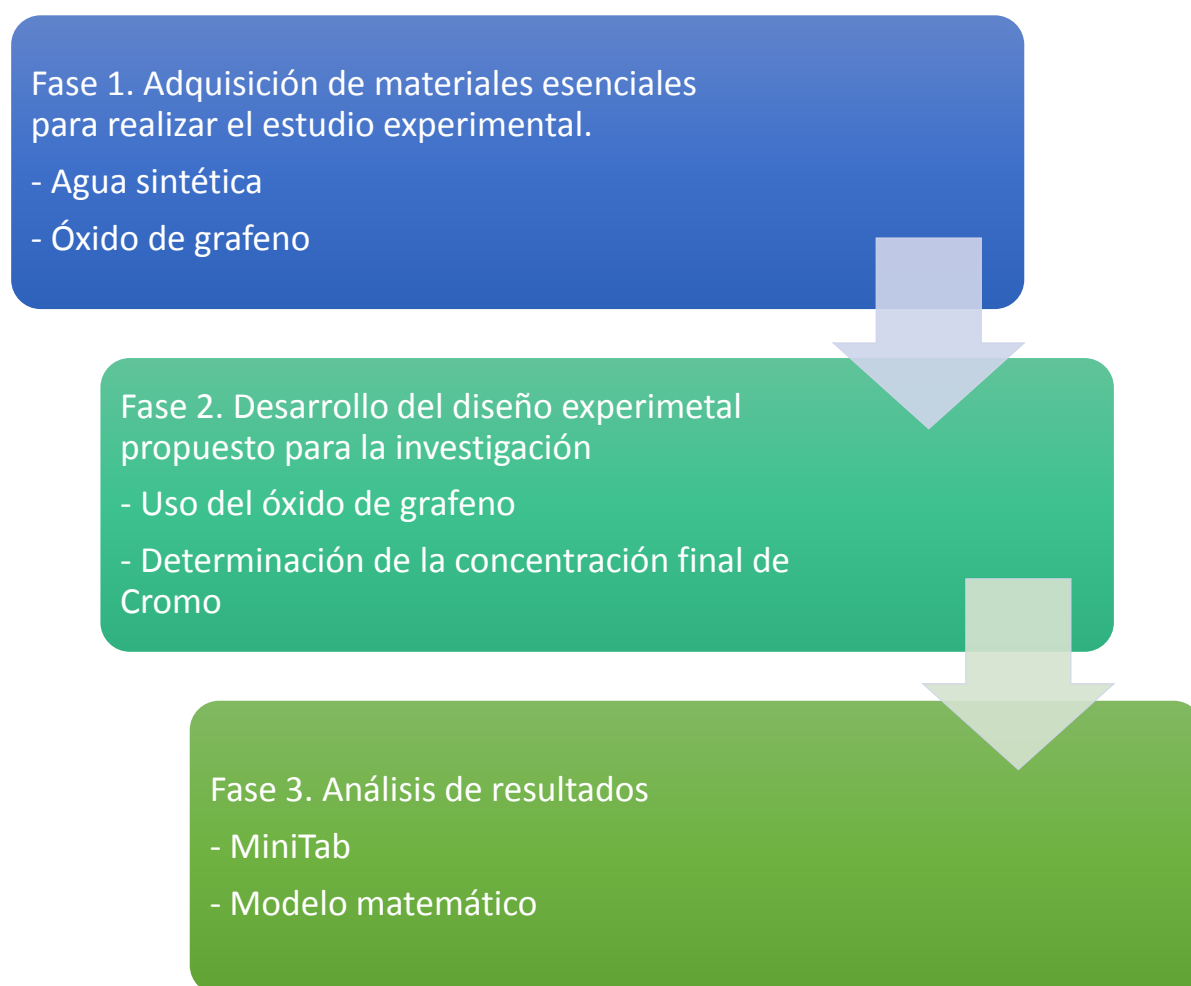
Este programa ejecuta funciones estadísticas básicas y avanzadas en las cuales permite realizar pruebas de hipótesis y gráficas de control que describen el comportamiento de las variables evaluadas, además de valorar el diseño de experimentos factoriales a dos niveles, de parcela dividida entre otros.

En cuanto al diseño de experimentos que evalúa el programa permite investigar los efectos de las variables de entrada en una variable de salida a la vez. Dichas variables consisten en una serie de ensayos en los que se llevan cambios dirigidos en las variables de entrada. En cada ensayo son recopilados datos. Se utiliza este diseño para identificar las condiciones de los procesos y los

componentes de los productos que repercuten en la calidad y luego, determinar la configuración de las variables que optimicen resultados.

## METODOLOGÍA

Se realizan tres fases importantes, con las cuales se pretende evaluar la efectividad de remoción por parte del óxido de grafeno como un material novedoso a ser utilizado en el tratamiento de aguas residuales. En el diagrama mostrado a continuación se sintetiza el procedimiento llevado a cabo para el desarrollo de este trabajo investigativo acompañado de ilustraciones que evidencian el trabajo realizado en el laboratorio.



*Ilustración 2. Descripción gráfica del procedimiento llevado a cabo en el laboratorio.*



La Ilustración 2, muestra de forma gráfica los pasos empleados de forma experimental en el laboratorio, en donde se observa en el numeral 1 la diferencia entre las muestras de agua sintética obtenidas con un pH 2 (amarillo oscuro) y un pH 8 (amarillo claro); El numeral 2, muestra los elementos empleados para la agitación magnética en donde entra en contacto el óxido de grafeno con el Cromo que se busca remover de la muestra; En el numeral 3 se emplea la máquina de centrífuga en las muestras anteriores, con la cual se busca precipitar el óxido de grafeno como se evidencia en el numeral 4 donde el óxido de grafeno se observa en la parte inferior de la celda. Al manejar una concentración de Cromo inicial de 300 ppm y una coloración fuerte en las muestras, se procede a realizar diluciones (numeral 5) con el fin de ajustar las concentraciones finales de cromo al rango de medición del espectrofotómetro utilizado (0,01-0,70 ppm).

Finalmente, el numeral 6 demuestra el viraje de color por parte de las muestras al seguir el método HACH-8024 de medición de Cromo Total por Oxidación Alcalina con Hipobromito

### ÓXIDO DE GRAFENO

El óxido de grafeno utilizado se obtuvo en la casa comercial Masertivos (Materiales asertivos) localizada en Medellín Antioquia, esta industria, fabrica nano compuestos basados en grafeno; El GRENOX es una dispersión que contiene oxido de grafeno (GO) y Óxido de grafeno de pocas capas (FLG-O) con un espesor promedio de 8 nm y ancho variable en la escala micrométrica en las superficies planas, que van insertados en una matriz líquida de agua

*Tabla 3. Tabla de propiedades del GO GRENOX.*

PROPIEDADES	UNIDAD	VALOR
Lote	#	MAind009-01
Fecha de envasado	N/A	25 de junio de 2018
Espesor promedio nanoplacas	nm	8
Diagonal promedio nanoplacas	μm	6
Solvente	N/A	Agua desmineralizada
pH	N/A	6,74
Concentración	mg/L	500 ± 20
Fecha de vencimiento	N/A	06 de agosto de 2018

Obtenido de (Hoja Técnica de Calidad, Masertivos, 2018)

*Ilustración 3. Presentación del GO en dispersión.*



Obtenido de (Elaboración propia)

La Ilustración 3 es una fotografía que hace referencia al empaque original en el momento de la adquisición del producto.

En la Tabla 4, se presentan las variables estudiadas con los respectivos valores que se definieron para cada una, basadas en los estudios que sustentan el uso de GO en la remoción de Cromo en aguas residuales, son las más relevantes.

*Tabla 4. Variables medidas durante el estudio*

VARIABLE	VALOR
Carga de óxido de Grafeno	50-70 mg/l
pH	2-8
Tiempo	30-90 minutos
Concentración típica de Cromo Total	300 mg/l

Obtenida de (Elaboración propia)

## RESULTADOS

Luego de tener el valor de la concentración final de Cromo en las muestras analizadas en el laboratorio, se proceden a ordenar en tablas que permitan una mayor comprensión de los resultados. En la Tabla 5, se muestra la forma en cómo se organizaron los datos en función de los parámetros evaluados, orden y nomenclatura seguida en la metodología y en el posterior análisis de resultados.

*Tabla 5. Variables por evaluar en el ensayo.*

Número de Muestra	pH	Tiempo (Minutos)	Concentración de Óxido de Grafeno (mg/L)
1.	2	90	50
2.	8	90	50
3.	2	90	70
4.	8	90	70
5.	2	30	50
6.	8	30	50
7.	2	30	70
8.	8	30	70

Obtenido de (Elaboración Propia)

La Tabla 6 define el número de muestra empleado y cada una de las variables medidas; en la segunda columna se expresa la concentración de cromo inicial en cada una de las muestras, valor que se observa de forma alternada, debido al volumen de hidróxido de sodio y ácido sulfúrico utilizado en el momento de realizar el cambio de pH inicial del agua sintética. En la tercera columna, se define los mg de Cr inicial en función del volumen de muestra de agua sintética y óxido de grafeno utilizado en la fase 2 de la metodología (Ilustración 2, numeral 2). La cuarta columna denota la masa en mg de óxido de grafeno añadida a cada una de las muestras para remover el cromo, dicha masa está dada en función de la carga de óxido de grafeno denotada en

la Tabla 4 y el volumen empleado en la fase 2 de la metodología (Ilustración 2, numeral 2). La quinta columna, es el resultado de la interacción del óxido de grafeno como agente reductor del cromo inicial presente en la muestra, en donde se expresó el resultado en términos de concentración (mg/L) final. La sexta columna, es la masa final de Cromo en función del volumen utilizado en la fase 2 de la metodología (Ilustración 2, numeral 2). Finalmente, en la séptima columna se expresa la capacidad específica de remoción del óxido de grafeno definido en términos de mg de Cromo removido por cada mg de óxido de grafeno utilizado para dicha remoción.

*Tabla 6. Relación de remoción de Cromo con el Óxido de grafeno*

Número de Muestra	[Cr] <sub>o</sub> Total (mg/L)	Masa [Cr] <sub>o</sub> Total (mg)	Masa OG (mg)	[Cr] <sub>final</sub> (mg/L)	Masa [Cr] <sub>final</sub> mg	mg Cr removido/mg OG utilizado
1.	180	6,30	1,75	103	3,80	1,43
2.	230	8,05	1,75	178	4,50	2,03
3.	180	6,30	2,45	125	3,90	0,98
4.	230	8,05	2,45	187	5,60	1,00
5.	180	6,30	1,75	162	5,60	0,40
6.	230	8,05	1,75	220	5,70	1,34
7.	180	6,30	2,45	149	5,50	0,33
8.	230	8,05	2,45	206	6,70	0,55

Obtenida de (Elaboración Propia)

La Tabla 7 recopila los datos que permiten evaluar la relación expresada como la capacidad específica de remoción en donde la muestra #2 obtuvo el valor máximo de 2,03 mg de Cromo removido por cada mg de óxido de grafeno utilizado, dicha muestra tenía pH 8 y donde el cromo estuvo en contacto con el agente reductor en agitación magnética durante 90 minutos. Por otro lado, la muestra #7, obtuvo el valor mínimo de 0,33 mg de Cromo removido por cada mg de óxido de grafeno utilizado, dicha muestra tenía pH 2 y donde el cromo estuvo en contacto con el agente reductor en agitación magnética durante 30 minutos.



Tabla 7 Resumen de resultados

Número de Muestra	pH	Tiempo (Minutos)	Concentración de Óxido de Grafeno (mg/L)	mg Cr removido/mg OG utilizado
1.	2	90	50	1,43
2.	8	90	50	2,03
3.	2	90	70	0,98
4.	8	90	70	1,00
5.	2	30	50	0,40
6.	8	30	50	1,34
7.	2	30	70	0,33
8.	8	30	70	0,55

Obtenida de (Elaboración Propia)

Finalmente, se procede a utilizar los valores expuestos en la Tabla 7 para un análisis estadístico con el programa MiniTab, en el cual se plantea el uso de un diseño experimental el cual evalúa la relevancia de cada variable de entrada como lo es el pH, el tiempo de contacto con la sustancia y la concentración de esta, para un resultado final positivo reflejado en la mayor cantidad de cromo removido por mg de óxido de grafeno utilizado. Posterior a esto, se evalúa la cantidad experimental registrada y teórica tanto del Cromo final como del óxido de grafeno utilizado, basado en un modelo matemático lineal con ayuda de la herramienta estadística R STUDIO, el cual, en teoría arroja el valor óptimo de óxido de grafeno a utilizar para remover la cantidad teórica de Cromo.

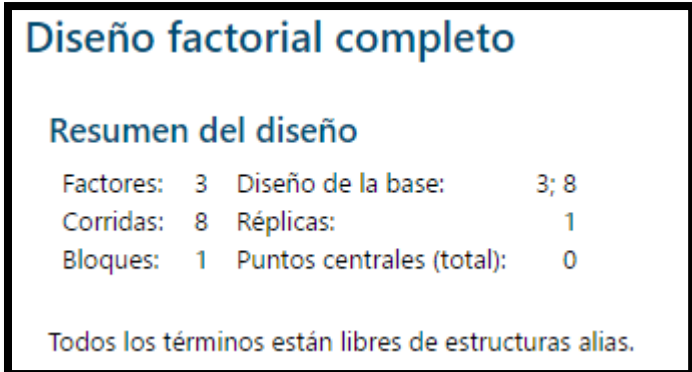
#### MINITAB®

Inicialmente se realiza un diseño de experimentos que ayudará a investigar cual es el efecto de las variables de entrada del estudio (Tiempo de contacto, pH y masa de GO utilizada) en una variable de salida (Concentración final de Cromo Total); Todo se evalúa según los datos obtenidos tras realizar los ensayos previos en el laboratorio.

Minitab® ofrece cuatro tipos de diseños: diseños factoriales, diseños de superficie de respuesta, diseños mixtos y diseños de Taguchi. Para el presente estudio se realiza con el diseño factorial  $2^n$  en el cual  $n$  es el número de variables que van a ser evaluadas (3).

Se empieza seleccionando el diseño que será utilizado y se define las réplicas que fueron realizadas, continua con nombrar los factores y los valores que tendrán. El programa mismo aleatoriza los ensayos y los estudia. Como resultado se tiene el cuadro de resumen del diseño experimental (Tabla 4) y una tabla que permite añadir el resultado obtenido en el laboratorio, en este caso de la cantidad de Cr Total después de utilizar el GO (Tabla 6).

*Ilustración 4 Diseño Factorial.*



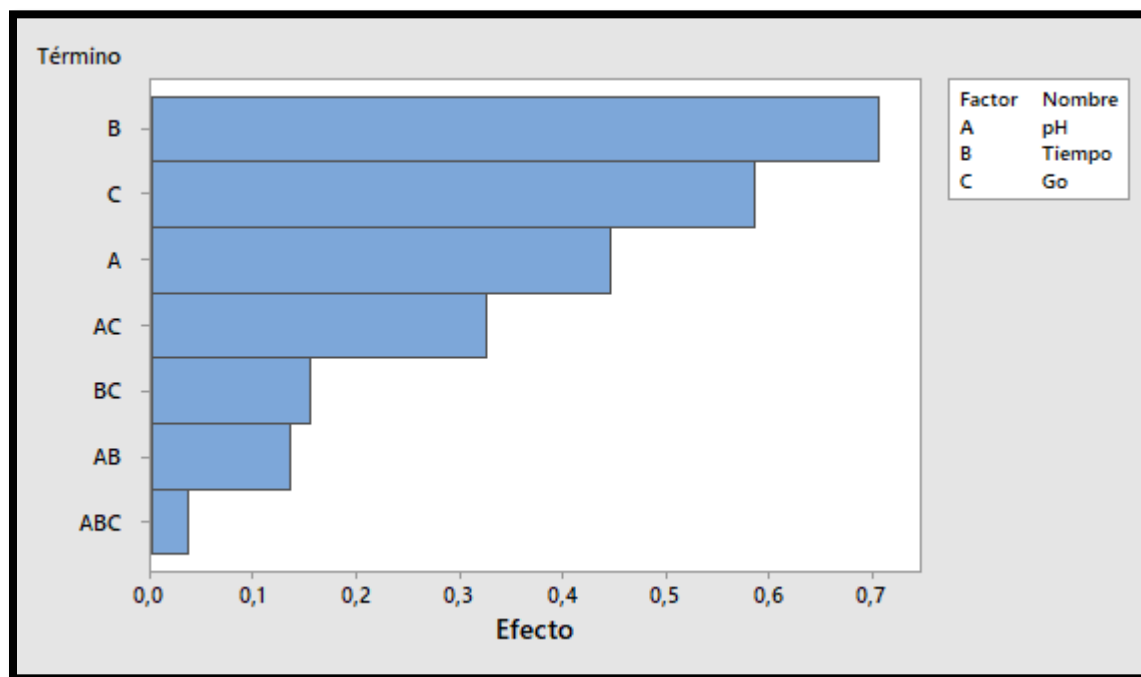
Diseño factorial completo			
Resumen del diseño			
Factores:	3	Diseño de la base:	3; 8
Corridas:	8	Réplicas:	1
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	0

Todos los términos están libres de estructuras alias.

Obtenido de (Elaboración propia. MiniTab®, 2017)

La Ilustración 4 muestra el diseño factorial empleado en el programa MiniTab® en donde se evalúan tres factores con 8 corridas cada uno y con una réplica. El programa a continuación arroja diferentes gráficas que permiten una mejor comprensión del resultado y la interacción de las variables.

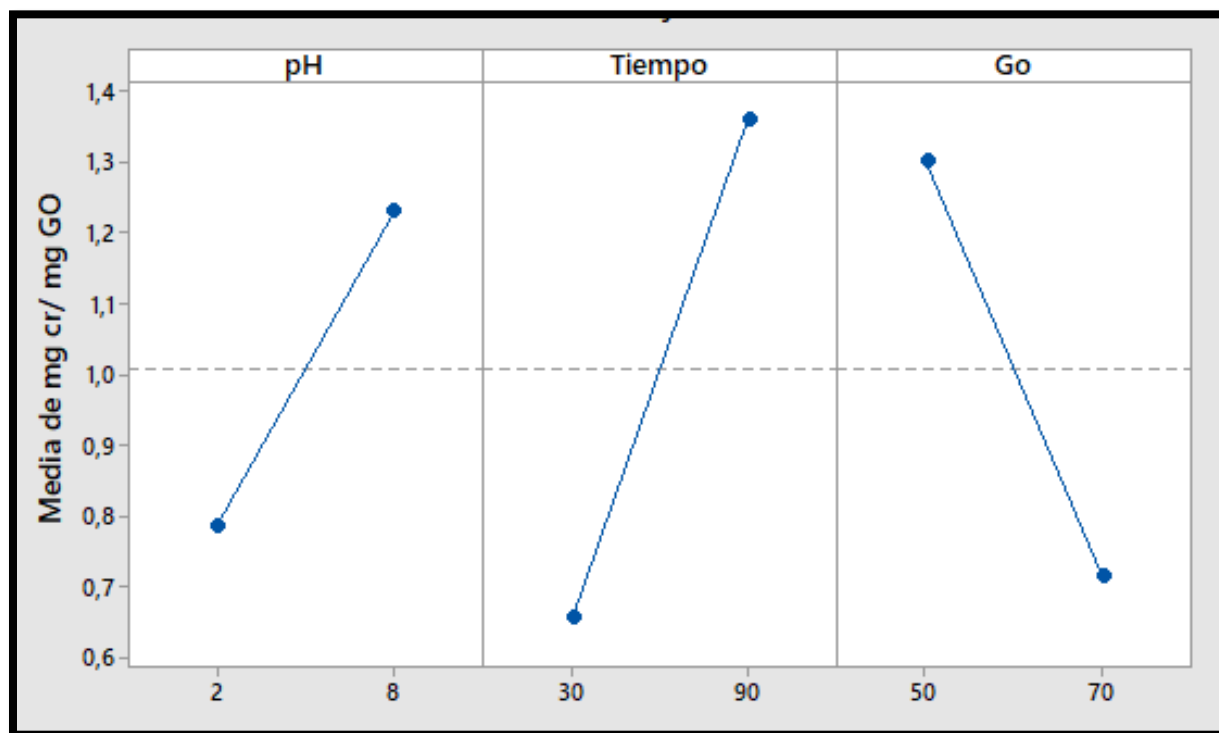
Gráfica 1. Diagrama de Pareto de los Efectos.



Obtenido de (Elaboración propia. MiniTab®, 2017)

El programa muestra el valor absoluto de los efectos en el diagrama de Pareto, nos enseña cuál de los factores tiene mayor efecto en el análisis de los datos, como se aprecia en el diagrama el factor B (Tiempo) es el más influyente comparándolo con los datos obtenidos en la Tabla 7 se observa que las primeras 4 muestras trabajaron a 90 minutos y muestran mayor capacidad específica de remoción que los datos obtenidos a 30 minutos, por esta razón el programa determina que este es el factor más con mayor efecto ya que al estar más tiempo en contacto el GO con el agente contaminante su eficiencia aumenta, el factor que sigue en la escala de los efectos es el factor C que hace referencia a la concentración de óxido de grafeno utilizada en el experimento igualmente al observar los datos de la Tabla 7 observamos que a una concentración de 50 mg/L de GO la capacidad específica de remoción es mayor a comparación de los datos obtenidos a partir de una concentración de 70 mg/L.

Gráfica 2 Efectos Principales para mg Cr final.

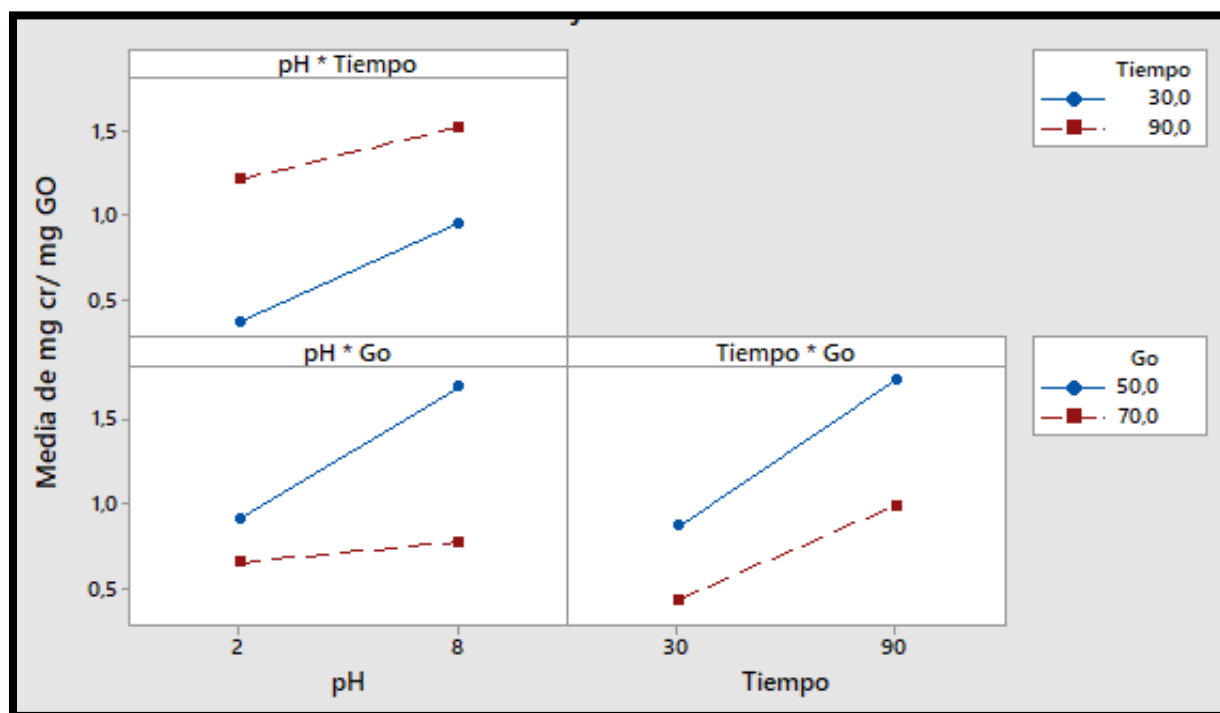


Obtenido de (Elaboración propia. MiniTab®, 2017)

La gráfica 2 arroja los efectos principales para la concentración final de cromo, el cual permite obtener mayor remoción de cromo por mg de GO utilizado para pH de valor 8, tiempo de 90 minutos y una concentración de GO de 50 mg/L. Dicho resultado permite evaluar que en términos prácticos es necesario invertir en sustancias que permitan basificar el residuo líquido obtenido por ejemplo en procesos industriales como lo son las curtiembres, en donde el resultado del proceso arroja una sustancia ligeramente acida (pH 4) y la cual debería llevarse a 8 para lograr una remoción efectiva del cromo como sustancia contaminante. Sin embargo, es importante recalcar que el uso del óxido de grafeno como agente reductor no necesita de grandes cantidades para su funcionamiento, ya que el resultado es muy claro al demostrar que menos concentración de GO no interfiere en la efectividad de remoción.

La gráfica 3 demuestra la interacción entre las variables, en donde se evidencia que la terna de variables que pueden disminuir en mayor medida la concentración inicial de Cromo se encuentra la de un tiempo de 90 minutos, un pH de 8 unidades y una cantidad de 50 mg/L de GO.

Gráfica 3 Interacción para mg Cr final. MiniTab®, 2017



Obtenido de (Elaboración propia. MiniTab®, 2017)

Cada punto del diagrama de interacciones muestra la capacidad específica de remoción media en distintas combinaciones de niveles de factor. Si las líneas no son paralelas, el diagrama indica que existe interacción entre los dos factores.,

## R STUDIO

Luego de realizar el análisis con MINITAB y evaluar las variables que interactúan de forma significativa con el modelo, se procede a realizar un modelo lineal basado en una regresión lineal que permita arrojar valores teóricos para la concentración final de Cromo y la masa de OG

óptima para remover esa cantidad de Cromo, sustentado en los valores betas que arrojan la regresión lineal de los parámetros explicativos en estudio.

El modelo matemático en el cual se basó el estudio se denota de la siguiente manera para hallar la cantidad cromo final en mg.

*Ecuación 1 modelo matemático R studio*

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 \quad (1)$$

Donde,

$\beta_0$ : Variable independiente (Intercepto)

$\beta_1$ : Valor beta de la masa del Cromo inicial (mg)

$X_1$ : Valor del Cromo Inicial en cada muestra

$\beta_2$ : Valor beta de la masa del OG (mg)

$X_2$ : Valor de la masa de OG utilizada en cada muestra

$\beta_3$ : Valor Beta del pH

$X_3$ : Valor de pH de cada muestra

$\beta_4$ : Valor beta del tiempo

$X_4$ : Tiempo utilizado en cada muestra

Posterior a evaluar el modelo matemático sobre las dos variables en las cuales se basa el estudio (remover mayor cantidad de Cromo, con baja cantidad de GO), se resumen en la siguiente tabla los datos obtenidos, los cuales se proceden a comparar con los datos reales obtenidos de forma

experimental, de manera tal que se obtiene una correlación del 60% para la masa final de Cromo y del 98% para la cantidad de OG teórico necesario.

*Tabla 8. Resumen del modelo matemático*

pH	Tiempo (Minutos)	Concentración de Óxido de Grafeno	Masa [Cr]final obtenida mg	Masa Teórica [Cr] final mg	Masa OG utilizada (mg)	Masa OG Teórica (mg)
2	90	50	3,8	<b>3,4</b>	1,750	<b>1,805</b>
8	90	50	5,0	<b>4,5</b>	1,750	<b>1,721</b>
2	90	70	4,5	<b>3,9</b>	2,450	<b>2,410</b>
8	90	70	5,5	<b>4,1</b>	2,450	<b>2,495</b>
2	30	50	5,7	<b>5,0</b>	1,750	<b>1,805</b>
8	30	50	6,2	<b>6,2</b>	1,750	<b>1,721</b>
2	30	70	5,1	<b>5,5</b>	2,450	<b>2,410</b>
8	30	70	4,6	<b>5,7</b>	2,450	<b>2,495</b>
2	90	50	3,8	<b>3,4</b>	1,750	<b>1,805</b>
8	90	50	4,5	<b>4,5</b>	1,750	<b>1,721</b>
2	90	70	3,9	<b>3,9</b>	2,450	<b>2,410</b>
8	90	70	5,6	<b>4,1</b>	2,450	<b>2,495</b>
2	30	50	5,6	<b>5,0</b>	1,750	<b>1,805</b>
8	30	50	5,7	<b>6,2</b>	1,750	<b>1,721</b>
2	30	70	5,5	<b>5,5</b>	2,450	<b>2,410</b>
8	30	70	6,7	<b>5,7</b>	2,450	<b>2,495</b>

Obtenida de (Elaboración Propia)

La masa de Cromo final experimental con respecto a la teórica presenta un menor grado de correlación posiblemente al cambio de pH efectuado inicialmente en el ensayo, ya que al emplear sustancias acidas y básicas diluidas en agua, pudieron alterar la concentración de cromo medida al principio del estudio. Sin embargo, fue acertado emplear las cantidades de óxido de

grafeno basados en el estudio bibliográfico, ya que dichos valores son óptimos en cuanto a la remoción de Cromo evidenciado en el valor teórico resultado del modelo.

## CONCLUSIONES

- Luego del análisis de una base bibliográfica sólida en el cual se evalúan estudios previos realizados con el óxido de grafeno, se identificó el pH, la concentración y tiempo de contacto con el GO como las variables que mayor relevancia tienen en cuanto a la disminución de Cromo en una muestra sintética inicial.
- Según los materiales, procedimientos e instalaciones accesibles para el estudio, se determina que el método más viable para la cuantificación del Cromo removido es a través del uso de la metodología HACH 8024.
- El óxido de grafeno utilizado como agente reductor en la matriz acuosa sintética obtenida en laboratorio disminuyó significativamente la concentración de cromo producto de los ensayos propuestos en el trabajo, comprobando así las capacidades adsorbentes del GO y su afinidad al cromo.
- El pH es una condición clave para el rendimiento de remoción de Cr (VI) encontrando que a menor pH dicho rendimiento aumenta, es decir, a menor pH mejora la interacción del GO con las especies de cromo ya que en condiciones de pH ácido se mejora la fijación de Cromo en la superficie de GO.
- El tiempo de interacción entre el GO y el agua sintética demostró que a medida que se aumenta el tiempo de contacto aumenta la adsorción de Cr (VI) por parte del GO, aunque no de manera significativa ya que se concluye que hay una saturación de cromo en el GO en un momento determinado, donde el GO no está en capacidad de adsorber más cromo.



- A mayor cantidad de GO la fijación de Cromo en la superficie de GO aumenta significativamente ya que el cromo tiene más área de GO con la cual interactuar y fijarse, además de esto gracias al que el GO tiene un área de superficie específica de  $600 \text{ m}^2/\text{g}$  aproximadamente, ideal para fijar el cromo en su estructura molecular.
- La capacidad específica máxima de remoción de Cr (IV) que oscila entre 2,03 y 0,33 miligramo de cromo removido por cada miligramo de óxido de grafeno siendo este un rango alto debió a su capacidad de adsorción y su gran área de superficie entre otras propiedades ya mencionadas anteriormente.

### RECOMENDACIONES

- Inicialmente se evaluó la capacidad máxima de remoción por parte del óxido de grafeno que permitía asemejar las condiciones iniciales de una muestra de agua sintética en cuanto a concentraciones máximas encontradas en una base bibliográfica previamente analizada, sin embargo, después de haber realizado el presente estudio se logra concluir que económicamente no es viable el uso de dicha sustancia para remoción de Cromo en industrias de curtido debido a su alto costo mas no por su innegable eficiencia de adsorción. Es por esto, que como recomendación se plantea el uso de este material en industrias donde se utiliza como materia prima el cromo hexavalente y pueda darse un reusó tanto a la especie química que se necesite como al óxido de grafeno, y de esta manera pueda eliminarse costos adicionales de adquisición del producto.
- Se sugieren estudios posteriores que permitan evaluar la facilidad de remoción del óxido de grafeno después de haber sido utilizado para de esta manera, evaluar la desorción, se recomienda la magnetización como una metodología de recuperación debido a las características del material.

- Según estudios previos, el óxido de grafeno es utilizado para el tratamiento de gran cantidad de contaminantes en el agua, los cuales incluyen moléculas orgánicas, metales pesados inorgánicos y microorganismos patógenos presentes en el agua, es por esto que es necesaria evaluar la efectividad del uso de esta sustancia con respecto a la interferencia que pueda haber entre diferentes compuestos con propiedades físicas y químicas distintas que puedan ser adsorbidos por el GO y que disminuyan su eficiencia.
- En cuanto al residuo líquido que pueda formarse producto del lodo que contiene contaminantes removidos y óxido de grafeno, se han realizado estudios que permiten evaluar la mezcla entre nanopartículas magnéticas y otras sustancias que permiten la posterior separación y reusó del óxido de grafeno. Se recomienda evaluar la metodología empleada en el estudio "*Treatment of diary wastewater by graphene oxide nanoadsorbent and sludge separation, using In Situ Sludge Magnetic Impregnation (ISSMI)*" para separar los compuestos que puedan ser útiles en un nuevo proceso de separación de contaminantes en una matriz acuosa. Los residuos que no puedan ser recuperados, deben ser dispuestos según la normatividad legal vigente que involucra residuos peligrosos debido a las características de las sustancias removidas.
- Para la obtención de la sustancia y posible implementación de esta en cualquier proceso productivo, es necesario evaluar la alianza con una industria química que pueda desarrollar la oxidación del grafeno de forma continua y a un bajo costo o la fabricación propia, ya que, si se adquiere de forma discontinua, puede aumentarse el costo de esta, debido a que su fabricación requiere de gran cantidad de materiales y fases para alcanzar la presentación final del GO en dispersión o sólido.

## BIBLIOGRAFÍA

- Graphenano nanotechnologies. (2017). *El grafeno: propiedades y aplicaciones*. Yecla (Murcia).
- Contreras, M. J. (2015). *Síntesis de óxido de grafeno como plataforma nanoscópica para materiales funcionales*. Instituto politecnico nacional : Centro de Investigacion en ciencia aplicada y tecnologia avanzada, unidad Altamira .
- Lenntech.es. (Agosto de 2017). *Lenntech.es*. Recuperado el 30 de Agosto de 2017, de Water treatment Solutions. Tabla periódica: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cr.htm>
- Remtavares. (Diciembre de 2015). *Fundación para el conocimiento Madrid*. Recuperado el Agosto de 2017, de Blog. Contaminación del agua con Cromo : <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2015/12/09/132418>
- shell, A. o. (Julio de 2010). *IEEE Xplore. Digital library*. Recuperado el Septiembre de 2017, de Environmental Science and Information Application Technology: <http://ieeexplore.ieee.org.hemeroteca.lasalle.edu.co/document/5568291/?reload=true>
- alginate, A. k. (Octubre de 2012). *IEEE Xplore. Digital library*. Recuperado el Septiembre de 2017, de Geomatics for integrated water resource Management: <http://ieeexplore.ieee.org.hemeroteca.lasalle.edu.co/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=6335569>
- Definition, A. (2010). *ThoughtCo*. Recuperado el Septiembre de 2017, de Science: <https://www.thoughtco.com/definition-of-adsorption-605820>
- Activo, A. /. (2017). *Lenntech*. Recuperado el Septiembre de 2017, de Water Treatment Solutions: <http://www.lenntech.es/adsorcion.htm>
- Heruzo, J. A. (2014). *Gafreno, descontaminacion de aguas residuales*.

- Deng, X., Lü, L., Li, H., & Luo, F. (2010). The adsorption properties of Pb(II) and Cd(II) on functionalized graphene prepared by electrolysis method. *Journal of Hazardous Materials*, 923-930.
- Porto, J. P., & Gardey, A. (2015). *Definicion.de*. Recuperado el Septiembre de 2017, de Definición de Adsorción : <https://definicion.de/adsorcion/>
- González, M. T. (Agosto de 2016). *nanotecnologia.fundaciontelefonica.com*. Recuperado el Septiembre de 2017, de óxido de grafeno: el más desconocido de la familia del carbono : <https://nanotecnologia.fundaciontelefonica.com/2016/08/24/oxido-de-grafeno-el-mas-desconocido-de-la-familia-del-carbono/>
- DAZA, L. V. (2012). *LAS CURTIEMBRES EN EL BARRIO SAN BENITO DE BOGOTÁ. Un análisis bioético en la perspectiva de Hans Jonas*. BOGOTÁ: INSTITUTO DE BIOÉTICA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA .
- Nupearachchi, C. N. (2017). Application of graphene for decontamination of water; Implications for sorptive removal. *Groundwater for Sustainable Development*, 206-215.
- Han, L., Mao, D., Huang, Y., Zheng, L., Yuan, Y., Su, Y., . . . Fang, D. (2017). Fabrication of unique Tin(IV) Sulfide/Graphene Oxide for photocatalytically treating chromium(VI)-containing wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 519-525.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial . (25 de Octubre de 2010 ). Decreto Número 3930 de 2010 . *Uso del agua y residuos líquidos* . Bogotá, Colombia .
- N.I.Zaabaa, K.L.Foo, U.Hashim, S.J.Tan, Wei-WenLiu, & C.H.Voon. (2017 ). Synthesis of Graphene Oxide using Modified Hummers Method: Solvent Influence. *Procedia Engineering* .

Peshkovsky, A. P. (2013). Escalable alta potencia la tecnología ultrasónica para la producción de nanoemulsiones translúcido. *Ingeniería química y proceso: proceso de intensificación* .

Vazquez, A. (2011). *blogspot*. Obtenido de Actividades Antropogénicas: <http://adrianaavazquez-adriana-adriana.blogspot.com/2011/09/actividades-antropogenicas.html>

Bioenciclopedia. (2015). *Bioenciclopedia.com*. Obtenido de Contaminación Hídrica :  
<http://www.bioenciclopedia.com/contaminacion-hidrica/>

Mosquera, J. T. (2015). *encolombia*. Obtenido de Cromo en Urgencias Toxicológicas:  
<https://encolombia.com/medicina/guiasmed/u-toxicologicas/cromo/>

Caracol Radio. (2018). *Caracol.com.co*. Obtenido de Contaminación :  
[http://caracol.com.co/emisora/2018/09/27/bogota/1538050909\\_394544.html](http://caracol.com.co/emisora/2018/09/27/bogota/1538050909_394544.html)

Revista Virtual Pro. (2007). *revistavirtualpro.com*. Obtenido de Industria de cuero y las curtiembres: <https://www.revistavirtualpro.com/revista/industria-del-cuero-y-las-curtiembres/14>

Trejo, J. V. (2013). *Universidad de México*. Obtenido de Departamento fisicoquímica:  
[http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3.Fenomenosuperficiales.Adsorcion\\_23226.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3.Fenomenosuperficiales.Adsorcion_23226.pdf)

Rodriguez, R. E. (2013). *Universidad Autonoma de Coahuila*. Obtenido de Adsorción y su aplicación en tratamientos de efluentes industriales:  
<http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/CienciaCierta/CC34/1.html#.W9xO061DnzY>

Secretaria Distrital de Ambiente. (2016). *ambientebogota.gov.co*. Recuperado el 2018, de Guía de Producción mas limpia en la Industria de Curtido:  
<http://www.ambientebogota.gov.co/documents/24732/3987253/Gu%C3%ADa+de+produ>

cción+más+limpia+para+el+sector+curtiembres+de+Bogotá.+Enfoque+en+vertimientos  
+y+residuos.pdf

Barrera - Diaz, C., Lugo, V. , & Bilyeu, B. (2012). review of chemical, electrochemical and biological methods for aqueous. *Journal of Hazzardous materials*.

Costa, 2., & 2005, M. e. (s.f.). *Biorremediation Technologies: Recent advances*. Springer .

Arslan, Kadiiska, & Liu. (1987). Intracellular Chromium Reduction. *Biochim Biophys Acta*.

Kamaludeen, Baral, & Lu. (2006). Evaluation of Aquatic toxicities of Chromium and Chromium containing effluents in reference to Chromium Electroplating Industries . *Archives of environmental Contamination and Toxicology* .

Megharaj. (2003). Chromium-microorganism interactions in soils: Remediation implications. *Reviews of environmental contamination and toxicology* .