



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA QUÍMICA**

**“ANÁLISIS DE LOS PARAMETROS TERMODINAMICOS EN EL  
PROCESO DE ADSORCIÓN DE CADMIO EN OXIDO DE  
GRAFENO A NIVEL DE LABORATORIO”**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para otorgar al grado académico de:

**QUÍMICO**

**AUTORA: CAMILA JACQUELINE CAMINO GUAYUNLEMA**

**DIRECTOR: DR. JORGE EFRÉN SILVA YUMI PhD.**

Riobamba - Ecuador

2022

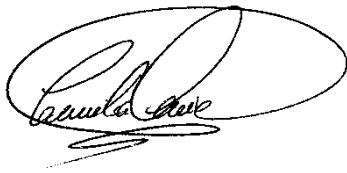
**©2022, Camila Jacqueline Camino Guayunlema**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, CAMILA JACQUELINE CAMINO GUAYUNLEMA declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 11 de agosto de 2022.

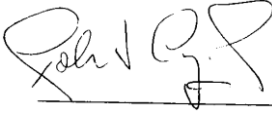


A handwritten signature in black ink, enclosed within a large, hand-drawn oval. The signature is cursive and appears to read 'Camila Camino'.

**Camila Jacqueline Camino Guayunlema**

**160083470-7**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA QUÍMICA**

El tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular: Tipo: Proyecto de Investigación: “ANÁLISIS DE LOS PARAMETROS TERMODINAMICOS EN EL PROCESO DE ADSORCIÓN DE CADMIO EN OXIDO DE GRAFENO A NIVEL DE LABORATORIO”, realizado por la señorita: **CAMILA JACQUELINE CAMINO GUAYUNLEMA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Dr. Robert Alcides Cazar Ramírez, PhD. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2022-08-11
Dr. Jorge Efrén Silva Yumi, PhD. <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2022-08-11
Dr. Fabián Ernesto Arias Arias, PhD. <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>		2022-08-11

## **DEDICATORIA**

A mi misma, por la constancia y dedicación a mi vida estudiantil, por ser valiente y fuerte frente a las adversidades que se me presentaron en este tiempo, por no decaer y terminar esta grandiosa etapa universitaria.

A mi madre, por su sacrificio y creencia en mi persona, por haber confiado en mi en cada decisión que ha sido tomada.

A mi padre, por su apoyo, consejos y paciencia durante toda esta trayectoria, gracias por el patrocinio que has brindado.

*Camila*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por haberme otorgado una familia maravillosa, quienes siempre han creído en mí, dándome ejemplo de superación, y sobre todo humildad y sacrificio; enseñándome a valorar todo lo que tengo e inspirándome a alcanzar muchas metas. Agradezco a todas aquellas personas que han formado parte de mi vida personal y académica, a mis amigos, compañeros y maestros quienes me brindaron incondicional motivación y palabras de aliento; a todos ellos dedico este trabajo porque han fomentado en mí el sentimiento de superación, lo que ha contribuido a la obtención de este logro, espero poder siempre contar con su incondicional y valioso apoyo.

*Camila*

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
RESUMEN.....	xii
SUMMARY/ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1

### CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. Antecedentes de la Investigación.....	5
1.2. Marco Teórico.....	6
1.2.1. <i>El grafeno</i> .....	6
1.2.2. <i>Óxido de Grafeno</i> .....	6
1.2.3. <i>Metales Pesados</i> .....	7
1.2.4. <i>Cadmio</i> .....	8
1.2.5. <i>Espectroscopía de absorción atómica</i> .....	8
1.3. Bases conceptuales.....	9
1.3.1. <i>Adsorción</i> .....	9
1.3.2. <i>Efecto del tiempo de contacto</i> .....	10
1.3.3. <i>Efecto del pH</i> .....	10
1.3.4. <i>Efecto de la temperatura y la termodinámica de adsorción</i> .....	10
1.3.5. <i>Cinética de Reacción</i> .....	11

### CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO.....	12
2.1. Materiales y métodos.....	12
2.2. Síntesis de Óxido de grafeno (OG).....	12
2.2.1. <i>Caracterización del OG</i> .....	13
2.3. Adsorción de Cd en OG.....	14
2.3.1. <i>Cinética y efecto del tiempo de contacto</i> .....	14
2.3.2. <i>Efecto del pH</i> .....	15

## CAPÍTULO III

<b>3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS</b> .....	16
<b>3.1. Caracterización del OG y rOG.</b> .....	16
<b>3.2. Análisis del proceso de Adsorción</b> .....	18
<b>3.2.1. Efecto del pH</b> .....	18
<b>3.2.2. Efecto del Tiempo de contacto</b> .....	19
<b>3.2.3. Cinética</b> .....	20
<b>3.2.4. Temperatura</b> .....	23
<b>CONCLUSIONES</b> .....	25
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	26
<b>GLOSARIO</b>	
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	
<b>ANEXOS</b>	



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2.</b> Diseño Experimental para la determinación de la cinética y el efecto del tiempo de contacto.....	14
<b>Tabla 2-2.</b> Diseño Experimental para la determinación del efecto del pH.....	15
<b>Tabla 3-3.</b> Análisis de las vibraciones del Espectro FT-IR .....	17
<b>Tabla 4-3.</b> Comparación de los parámetros cinéticos de la adsorción de Cd en OG.....	22

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3.</b> Efecto del pH sobre la capacidad de adsorción .....	18
<b>Gráfico 2-3.</b> Efecto del tiempo vs el % de Adsorción.....	20
<b>Gráfico 3-3.</b> Cinética de pseudo primer orden a) 25°C b) 40°C c) 50°C .....	21
<b>Gráfico 4-3.</b> Cinética de pseudo segundo orden a) 25°C b) 40°C c) 50°C .....	21

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1.</b> Estructura de Grafito, Grafeno, Óxido de Grafeno y Óxido de Grafeno Reducido ..	7
<b>Figura 2-1.</b> Esquema de un espectrofotómetro de FFA de has sencillo.....	9
<b>Figura 3-2.</b> Equipo utilizado para la oxidación del polvo de grafito.....	13
<b>Figura 4-2.</b> Proceso de síntesis de óxido de Grafeno .....	13
<b>Figura 5-3.</b> Espectro UV-Vis del óxido de grafeno .....	16
<b>Figura 6-3.</b> Espectro FT-IR del OG .....	17

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

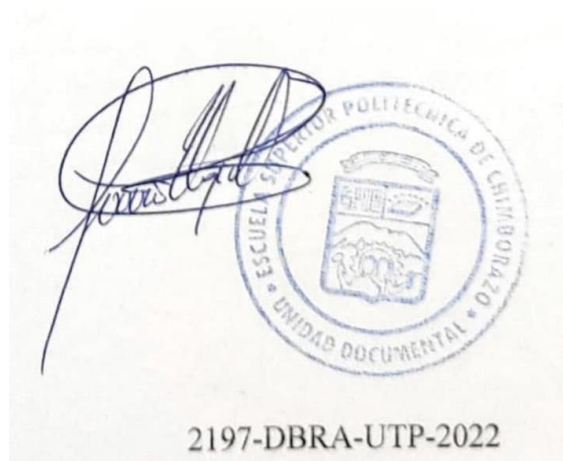
**ANEXO A:** RESULTADOS OBTENIDOS DE LA VARIACIÓN DEL PH EN UN TIEMPO DE 80MIN, 10 MG/L DE CD Y 0,1G DE OG

**ANEXO B:** DATOS OBTENIDOS DEL APARTADO CINÉTICA Y TIEMPO DE CONTACTO, A CONCENTRACIÓN INICIAL DE CADMIO DE 5MG/L Y 0,5 G DE OG

## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue analizar los principales parámetros termodinámicos de la adsorción de cadmio en Óxido de Grafeno (OG) a través de diferentes pruebas de contacto entre el metal y el material adsorbente con la finalidad de estudiar la capacidad de adsorción de este sistema y su potencial descontaminante. El material adsorbente, se obtuvo a través del método Hummers, mientras el cadmio corresponde a un estándar de grado analítico, posterior se realizó el proceso de adsorción con la variación de pH y temperatura verificando la cinética de reacción, tiempo de equilibrio y efecto que las variables producen. Inicialmente se realiza la síntesis de óxido de grafeno utilizando polvo de grafito, ácido sulfúrico, permanganato de potasio y peróxido de hidrógeno, seguido de lavados con ácido clorhídrico y agua destilada. El proceso de Adsorción comenzó con la variación de la temperatura en tres valores diferentes, una concentración de 5mg/L de cadmio y 0,5 g de OG a pH constante y agitación de 125rpm hasta alcanzar el equilibrio. Seguido también se varía el pH en condiciones de 10 mg/L de cadmio, 0,1 g de OG y temperatura ambiente; la concentración de cadmio se midió en el equipo de espectrofotometría de absorción atómica. Los resultados obtenidos indican que tanto el pH como la temperatura influye sobre la adsorción observándose picos de mayor o menor adsorción, sin embargo, en ninguna de las condiciones analizadas se logró obtener una buena eficiencia debido a que la capacidad de adsorción no lograba mantenerse en el tiempo y se verifica una continua adsorción y desorción del cadmio sobre la superficie del material, por lo cual se considera que este proceso fue ineficiente y se recomienda aumentar las variables al proceso además de ampliar la investigación con oxido de grafeno funcionalizado para aumentar la eficiencia de adsorción.


**Palabras clave:** <CADMIO>, <ÓXIDO DE GRAFENO>, <TERMODINÁMICA>, <ADSORCIÓN>, <METALES PESADOS>.



## SUMMARY/ABSTRACT

The objective of this research was to analyze the main thermodynamic parameters of cadmium adsorption in Graphene Oxide (OG) through different contact tests between the metal and the adsorbent material in order to study the adsorption capacity of this system and its decontaminating potential. The adsorbent material was gotten through the Hummers method, while the cadmium corresponds an analytical grade standard, then the adsorption process was carried out with the variation of pH and temperature verifying the reaction kinetics, equilibrium time and effect that the variables produce. Firstly, graphene oxide is synthesized using graphite powder, sulfuric acid, potassium permanganate and hydrogen peroxide, followed by washing with hydrochloric acid and distilled water. The adsorption process began with the variation of the temperature in three different values, a concentration of 5mg/L of cadmium and 0.5 g of OG at constant pH and agitation of 125rpm until equilibrium was reached. This is followed by a variation in pH under conditions of 10 mg/L cadmium, 0.1 g OG and ambient temperature; the cadmium concentration was measured in the atomic absorption spectrophotometry equipment. The results obtained indicate that both pH and temperature influence adsorption observing peaks of greater or lesser adsorption, however, in none of the conditions analyzed was it possible to get a good efficiency because the adsorption capacity could not be maintained over time and a continuous adsorption and desorption of cadmium on the surface of the material is verified, Therefore, it is considered that this process was inefficient and it is recommended to increase the variables to the process for expanding the research with functionalized graphene oxide to expand the adsorption efficiency.

**Key words:** <CADMIUM>, <GRAPHENE OXIDE>, <THERMODYNAMICS>, <ADSORPTION>, <HEAVY METALS>.



**Lic. Edison Renato Ruiz Lopez**

**CI: 0603957044**

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene la finalidad de ahondar en los conocimientos adquiridos en la carrera de Química, poniéndolos en práctica a través de un trabajo de Investigación que aporte conocimientos, datos o experiencias con algún tema de interés para la solución de un problema. El tema corresponde al análisis termodinámico de la adsorción de cadmio en óxido de grafeno, que pretende brindar algún aporte al tratamiento de aguas residuales en nuestro país.

Los metales pesados corresponden a los mayores riesgos que debemos enfrentarnos hoy en día, por su ubicuidad y el gran riesgo tóxico que estos presentan para todos los seres vivos. Sin embargo, dejar de hacer uso de estos no es tan fácil, porque se encuentra en varias áreas importantes de las industrias que son indispensables para diversos ámbitos de nuestra vida cotidiana. Fuera de esto, los humanos no somos los únicos responsables de la presencia de estos metales en las fuentes hídricas, sino que también la naturaleza misma en lugares puntuales tiende a liberar este elemento (Ghasemi et al., 2019, p. 1)(Bushra, Anees y Shahadat, 2017, p. 90).

La eliminación de estos metales en el agua, es el punto de interés de muchas investigaciones, que buscan encontrar procesos eficientes, ecológicos y de bajo coste (Fan et al., 2012, p. 1), uno de ellos considerado el más efectivo para estos procesos es la adsorción (Fan et al. 2012, p. 272) (Fernandes et al., 2010, p. 62).

La Adsorción en la cual se involucran el adsorbato (el contaminante), adsorbente y diversos parámetros de pH, temperatura, tiempo y concentración, es el proceso mayormente utilizado para la eliminación de varios de estos metales pesados, sin embargo, la eficiencia de eliminación también depende del tipo de adsorbente utilizado por lo que son diversos los materiales que se prueban para mejorar el proceso. (Fernandes et al., 2010, p. 62) (Bushra, Anees y Shahadat, 2017, p. 91)

El óxido de grafeno, uno de estos materiales adsorbentes, con excelentes propiedades que le permiten tener buenos resultados, ha sido probado con varios contaminantes, con resultados variados (Fan et al. 2012, p. 272).

De manera que, en este trabajo, se pretende adsorber en óxido de grafeno, uno de los metales pesados, el cadmio, que se elige debido a que estudios en el país, han hallado que la presencia de este elemento en ríos se encuentra cada vez más generalizada, a pesar que aún no se han reportado informes de toxicidad por este elemento en el país, la concentración en la que se encuentra es en los límites o por encima de los límites máximos permitidos (Mero et al., 2019). Para dar mayor eficiencia al proceso de adsorción, se pretende realizar específicamente el estudio termodinámico de diferentes variables para encontrar las condiciones más eficientes del proceso en condiciones de laboratorio.

Para poder realizar tal investigación, la metodología tanto como el análisis se basarán en bibliografía de (Arias Arias et al., 2017) y (Ghasemi et al., 2019) reportada para otros contaminantes. Esta

información será útil para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas del adsorbente en el tratamiento de aguas residuales.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **Situación problemática**

La contaminación por metales pesados se ha convertido en uno de los grandes problemas que nos enfrentamos hoy en día a nivel global, debido principalmente al rápido crecimiento de las industrias que hacen uso de estos materiales. Además de la atmósfera, los recursos hídricos son los más afectados por este tipo de contaminación, por lo cual se ha enfocado esfuerzos para encontrar maneras y/o tratamientos que permitan adsorber, retener o eliminar estos metales de los efluentes, los cuales se consideran tóxicos tanto para el medio como para el ser humano, presentándose estudios que demuestran alteraciones a nivel enzimático, renal, respiratorio y digestivo (García y Cruz, 2012, p. 200).

En la actualidad los estudios de diferentes tipos de materiales para la adsorción de metales pesados presentan un gran auge, como por ejemplo el uso de materiales nanocelulósicos, zeolitas, biomásas, etc.(Figuroa Guayllas, 2020; Barrera Molina y Granda Rivera, 2020; Vera et al., 2016; Villalón et al., 2018; Dimas Rivera, 2011); el uso de neomateriales como el óxido de grafeno (OG) ha dado una nueva perspectiva dentro del campo científico para la adsorción de metales pesados, obteniendo resultados eficientes con varios contaminantes (Núñez Niachimba, 2020; Gordón, 2017; Garcés Guamba y Morillo Morales, 2019; Poma Huamán, 2017). Aunque se ha investigado el uso del OG con diversos metales pesados, no aparecen estudios específicos que permita determinar las mejores condiciones termodinámicas de adsorción con este material para el cadmio, metal altamente tóxico según lo considera la Agencia Estadounidense de Toxicología (Carbonel, 2018), lo cual constituye un problema cercano, teniendo en cuenta que estudios de algunos ríos del Ecuador revelan dosis de cadmio muy por encima de los límites permitidos de acuerdo a la norma ecuatoriana y canadiense. (Mero et al., 2019; Delgado, Ayala y Páez, 2018; Marshall et al., 2018).

### **Formulación del problema**

La presente investigación tiene como finalidad verificar si ciertos parámetros termodinámicos afectan la capacidad de adsorción de cadmio en óxido de grafeno (OG) en soluciones acuosas respondiendo a la siguiente interrogante:

¿Los parámetros termodinámicos son factores que afectan la capacidad de adsorción de cadmio en OG en soluciones acuosas?



## **Justificación del problema**

Los metales pesados llevados por el rápido crecimiento industrial que hacen uso de estos se han convertido en una gran fuente de contaminación de los sistemas acuáticos, Ecuador no ajeno a esta realidad ha demostrado en diversos estudios la progresiva aparición de cadmio y otros metales en sus afluentes (Mero et al., 2019; Delgado, Ayala y Páez, 2018; Marshall et al., 2018), lo cual genera alarma, principalmente debido a la toxicidad que caracteriza a este grupo de elementos (Carbonel, 2018) Dada tal situación, es necesario investigar alternativas de materiales que posean características que permitan eliminar estos metales del agua.

La Adsorción en Oxido de Grafeno (OG), considerado el neomaterial más importante del siglo XX, es presenta como buena alternativa en el tratamiento de agua contaminadas de este tipo de compuestos debido a su alta capacidad de interacción con iones y cationes, además de su propiedad de ligarse con otros materiales y así elaborar dispositivos orientados a diferentes ciencias.(Berner Beltrán, 2017).

La presente investigación busca proporcionar información sobre los parámetros termodinámicos que permita encontrar las mejores condiciones en que el cadmio -uno de los metales pesados- pueda adsorberse en OG variando parámetros como temperatura y pH.

El aporte científico es de gran impacto al permitir conocer las dinámicas de adsorción del OG frente a metales pesados lo cual permitirá diseñar diferentes proyectos y/o plantas de tratamientos para la remoción de estos teniendo un gran impacto en la comunidad y sociedad en general; evitando las posibles consecuencias futuras como daños en la salud pública y la vida acuática en general.

La viabilidad del trabajo de titulación es auspiciada por el grupo de investigación GIMA dentro del proyecto “Síntesis y funcionalización de materiales orgánicos e inorgánicos a través de métodos físico - químicos para el tratamiento de aguas y aguas residuales” aprobado por el Instituto de Investigaciones de la Epoch- FCGI-013. Los recursos económicos provienen de fondos propios del estudiante y del grupo de Investigación.

## **OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **Objetivo general**

Estudiar los parámetros termodinámicos de la adsorción de cadmio en óxido de grafeno a través de la variación de la temperatura y pH para determinar su capacidad máxima de adsorción

## **Objetivos específicos**

- Sintetizar y caracterizar el óxido de grafeno que será utilizado como adsorbente en el presente estudio
- Analizar el efecto del pH sobre la capacidad de adsorción del Cd sobre OGr
- Determinar la cinética de reacción que modela el proceso de adsorción en OG
- Inferir si la temperatura es un factor determinante en la capacidad de adsorción del proceso

## **HIPÓTESIS**

### **Hipótesis general**

Los parámetros termodinámicos afectan la capacidad de adsorción de cadmio con óxido de grafeno.

### **Hipótesis específicas**

- La capacidad de adsorción de cadmio en óxido de grafeno solo se ve favorecida al aumentar el pH
- A mayor tiempo de contacto entre el adsorbato y adsorbente, el porcentaje de adsorción aumenta.
- La temperatura es un factor importante en el mecanismo de adsorción, de manera que al aumentar la temperatura se alcanza el equilibrio más rápido
- La cinética que modela el proceso de adsorción de Cd en OG corresponde al modelo pseudo segundo orden

## CAPÍTULO I

### 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1. Antecedentes de la Investigación

Al ser la contaminación del agua, una de las mayores preocupaciones a nivel global, varias son las investigaciones que se han realizado para tratar de eliminar estos contaminantes a través de diferentes métodos, los cuales difieren unos de otros en eficiencia, costos, tipo de material, concentración de contaminante, así como también de la zona donde se vaya a emplear. Entre los métodos que Ghasemi et al (2019, p. 1) menciona se encuentran: oxidación, reducción, ósmosis inversa, biofiltración, electrodiálisis, coagulación, floculación, adsorción, etc. Siendo esta última, la técnica más económica y eficiente en la mayoría de casos. (Ghasemi et al., 2019, p. 2).

Al ser además un método sencillo, es el más utilizado en diversos estudios para analizar la eliminación de metales pesados y tintes iónicos de las aguas residuales, probando la capacidad de adsorción de diferentes tipos de materiales, por ejemplo, Oliva et al.(2011) utilizó carbones activados como absorbente de cadmio demostrando una buena eficiencia del proceso, igualmente Carbonel (2018) a través de tratamientos minerales (bentonita, caolín, zeolita) logró obtener adsorciones mayores al 90% (Carbonel, 2018).

Otros tratamientos de adsorción también hacen uso de materia orgánica, mayormente mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos como lo propuso Ramón De Los Santos et al.( 2019) a través del reúso de los desechos de conchas de ostión en forma de nanoestructuras de  $\text{CaCO}_3$  biogénico como adsorbente de los iones metálicos cobre y cadmio en medio acuoso; o la utilización de bioadsorbentes como el quitosano (Fan et al., 2012). Sin embargo, pese a los buenos porcentaje de adsorción que presentan, existen inconvenientes en la selectividad o tiempo de contacto que necesita para que ocurra el fenómeno.

Desde hace unos años, la investigación de nuevos materiales que permita vencer estos inconvenientes y mejorar el proceso de adsorción de metales pesados, logró desarrollar el óxido de grafeno, el cual es bastante atractivo debido a las características tan eficientes que posee dentro de los procesos de adsorción, de modo que al probar su capacidad de adsorción frente al ion Zinc combinado con compuesto magnetita (MG) demostraron una eficiencia promedio del 93% a 2horas de reacción.(Garcés Guamba y Morillo Morales, 2019).

Otro estudio demostró que de la misma manera el óxido de grafeno al que se le injertó un novedoso quitosano magnético, al adsorber el contaminante azul de metileno se logró demostrar que la capacidad de adsorción era aproximadamente de 90% de la capacidad de adsorción de saturación inicial después de ser utilizado cuatro veces (Fan et al., 2012).

Así mismo, el estudio de parámetros termodinámicos fue evidenciado en diferentes procesos como una forma de mejorar el mecanismo de adsorción tal como lo realizó Ghasemi et al.(2019) al medir la adsorción de iones de mercurio de una solución acuosa sintética utilizando SWCNT funcionalizados por polidopamina considerando ciertos parámetros experimentales como la dosis de adsorbente, el pH de la solución, la concentración inicial de los iones metálicos, la termodinámica del proceso y el mecanismo de desorción en el sistema por lotes. De manera similar, Arias et al.( 2020) en su publicación “La adsorción de azul de metileno en óxido de grafeno reducido ecológico” incluye varios análisis cinéticos, isothermas y termodinámicos para demostrar con éxito la adsorción de azul de metileno (MB), técnica que resulta muy útil para la determinación de una buena capacidad de adsorción a determinadas condiciones de operacionalización.

## **1.2. Marco Teórico**

### ***1.2.1. El grafeno***

El grafeno corresponde a un material recién descubierto por Geim y Novoselov en el año 2004 (Novoselov citado en Gago et al., 2016, p. 3) que se encuentra dentro de los nanomateriales, es decir, corresponde a un material que se encuentra dentro de la nanoescala, característica que le atribuyen múltiples propiedades.

Químicamente, el grafeno está formado por átomos de carbono puro en una estructura bidimensional de átomos de carbono con hibridación  $sp^2$ , ordenados en un arreglo hexagonal (*Ver Figura 2-1*)(Ickecan, Zan y Nezir, 2017, p. 1), formando láminas las cuales se aplican unas sobre otras, de tal manera que existe un enlace entre los átomos de cada capa además de los enlaces con los átomos de las otras láminas. (Carreón citado en Gago et al., 2016, p. 88).

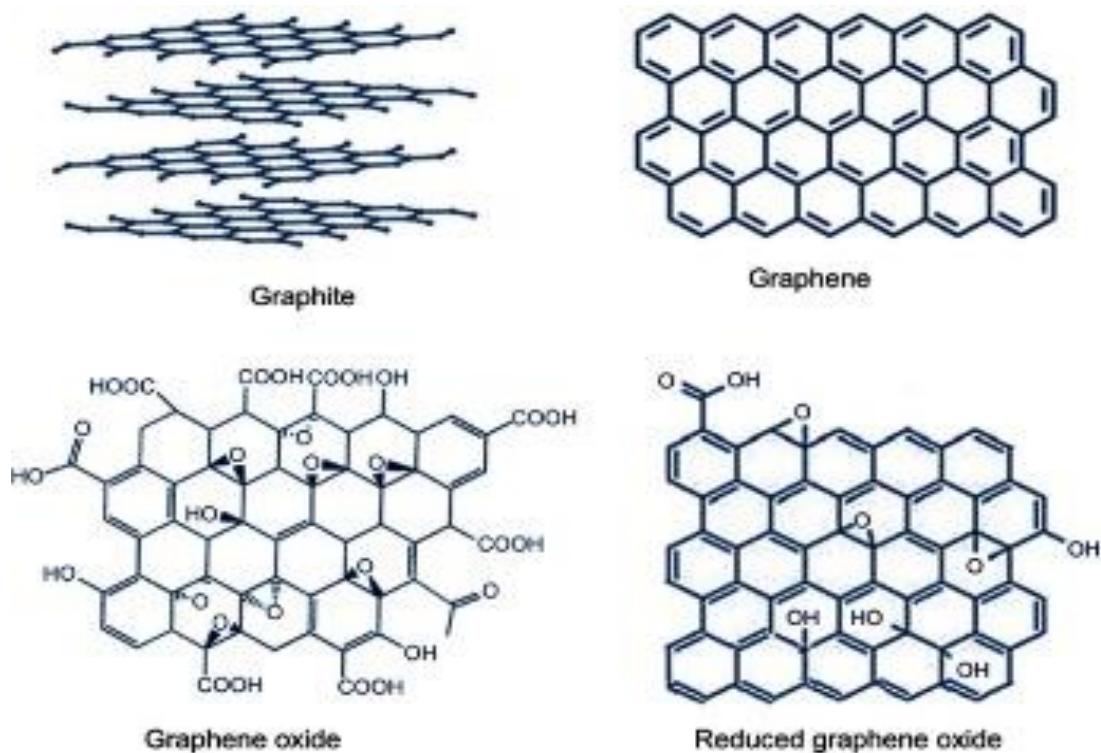
Estas características estructuras permiten que el grafeno sea estable a temperatura ambiente, presente una elevada conductividad térmica y eléctrica, resistencia, flexibilidad, y de manera general excelentes propiedades mecánicas, ópticas y eléctricas (Gago et al., 2016, p. 88).

### ***1.2.2. Óxido de Grafeno***

El óxido de grafeno se obtiene a partir del grafeno por diferentes tipos de procesos oxidativos, sea por el método Brodie, Staudenmaier, o el más común el método de Hummers, que consiste en introducir grupos funcionales oxigenados en la estructura del grafito en polvo, utilizando como reactivos compuestos que actúen como agentes oxidantes, como es el caso del permanganato de potasio ( $KMnO_4$ ) (Tovar Martínez, 2017).

Este agente oxidante permite que grupos epoxi, carboxilo e hidroxilo se ubiquen en ambos lados de la hoja contribuyendo significativamente a su hidrofilia y alta densidad de carga negativa, además los carbonos de la estructura adquieren una hibridación  $sp^2$  y  $sp^3$  lo cual le atribuye su característica híbrida ayudando tanto a inmovilizar moléculas como la transferencia de cargas. (Martínez Orozco, 2015; Gago et al., 2016).

Algo que cabe señalar, es que luego del proceso oxidativo lo que se obtiene el óxido de grafito (OGr) en laminas y mediante un proceso de exfoliación de este material (sonicación o agitación magnética) se obtiene el óxido de grafeno en monocapa.



**Figura 1-1.** Estructura de Grafito, Grafeno, Óxido de Grafeno y Óxido de Grafeno Reducido

Fuente: (Geetha Bai et al., 2019).

### 1.2.3. Metales Pesados

Los metales pesados corresponden a un grupo de elementos que comparten ciertas características, como una elevada densidad, he ahí que son llamados pesados. Sin embargo, la principal característica que los hace comunes entre sí, es el impacto ambiental que provocan así como en la salud de las personas (Covarrubias y Peña Cabriales, 2017, p. 8), esto menciona Carreño Mendoza et al. (2019, p. 88) que se debe a la estabilidad, alta solubilidad y actividad de migración de estos metales en medios acuosos, potenciado por la bioacumulación en las cadenas tróficas.

La contaminación causada por estos metales pesados se considera una de las causas de mayor impacto a nivel mundial, ya que las crecientes industrias en desarrollo cada vez hace uso de estos

materiales como materia prima o son parte de sus procesos industriales, sin embargo, las características físicas y químicas de este grupo de elementos provocan diversos daños cuando el grado de exposición y cantidad es lo suficientemente alta para provocar consecuencias a los organismos expuestos, debido principalmente al desecho inadecuado que se realizan de estos. (Vela-García, Guamán-Burneo y González-Romero, 2019).

#### **1.2.4. Cadmio**

El cadmio es uno de los elementos de la familia de los metales pesados, se encuentra de manera natural en la corteza terrestre normalmente combinado con otros elementos como S, Cl u O, la mayoría de ellos bastante estables, a excepción del CdO. Sus características corresponden a ser un metal blando, dúctil, insaboro e inodoro. (Jiménez Castilla, 2013, p. 127).

Jiménez Castilla (2013, p. 127) menciona que para la industria una de las principales fuentes de obtención de este elemento son las rocas que contienen en su composición zinc, plomo o cobre. Posteriormente, las aplicaciones de este metal en la industria son numerosas, principalmente en la fabricación de pigmentos, pilas eléctricas y plásticos, así como las industrias del acero y el plástico (Weiner, 2012, p. 497).

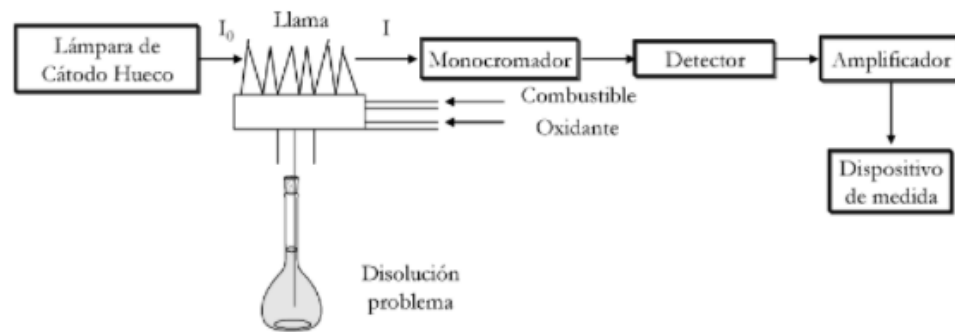
Al ser un material ampliamente utilizado, la contaminación del agua por este también se ve incrementado, sea por el desecho de aguas residuales sin tratamientos o causada por impurezas en el zinc de las tuberías y soldaduras galvanizadas y algunos accesorios metálicos. (Organization World Health (OMS), 2004, p. 317) (Pinos N y Silva Y, 2009, p. 56).

La toxicidad que este elemento produce incluso a concentración pequeñas es bastante peligrosa, tanto para la vida acuática como que aquellos que dependemos de esta (Brown et al., 2004, p. 245). Valle y Florentino (2000, p. 59) indican que entre los efectos agudos que provoca la toxicidad de este metal se observan alteraciones generalizadas, con problemas respiratorios, bronquitis, neumonía, arterioesclerosis e hipertensión. Finalmente, la OMS (2004, p. 317) presenta valores de 1 ug/L como límite permitido de contenido de Cadmio en agua.

#### **1.2.5. Espectroscopía de absorción atómica**

La espectroscopía de absorción atómica es un método para la detección y la determinación de elementos químicos, particularmente de elementos metálicos (Walton y Reyes, 1983, p. 253); metodología que permite medir las concentraciones específicas de un cierto elemento dentro de una mezcla, basado en la capacidad de los átomos de adsorber luz a longitudes de onda específicas (Sierra, Perez y Morante, 2008, p. 67).

En el equipo, un rayo luminoso de una cierta longitud de onda, producido por un tipo especial de lámpara, se dirige a lo largo del eje longitudinal de una llama plana y hacia un espectrofotómetro. Simultáneamente, la solución de la muestra es aspirada hacia el interior de la llama. Antes de entrar en ésta, la solución es dispersada formando una niebla de gotitas muy finas, que se evaporan en la llama dando inicialmente la sal seca y luego el vapor de la sal, el cual se disocia, por lo menos en parte, en átomos del elemento que se desea determinar (Walton y Reyes 1983, p. 254).



**Figura 2-1.** Esquema de un espectrofotómetro de FFA de haz sencillo

Fuente: (Sierra, Perez y Morante, 2008).

### 1.3. Bases conceptuales

#### 1.3.1. Adsorción

La adsorción corresponde a un proceso fisicoquímico que involucra la transferencia de masa desde una fase líquida hacia una sólida sin producirse la formación de nuevos compuestos, sino que a través de interacciones moleculares y difusión de moléculas se mantiene juntos. Este proceso se realiza principalmente cuando se pretende rescatar un elemento de una solución, haciendo que este se adsorba sobre una superficie (H.Y. Zhu citado en Fan et al., 2012, p. 275).

Para que ocurra este fenómeno es necesario de dos elementos, el material adsorbente, sobre el cual se receptorá iones, moléculas o compuestos dependiendo del material, y el adsorbato, que corresponde al elemento a adherirse sobre la superficie del adsorbente.

Para buena eficiencia de este proceso, es necesario tomar en cuenta varios parámetros que permitirán hallar las mejores condiciones en que se produce la mejor adsorción sobre el material, estos parámetros corresponden a el pH, la temperatura, la dosis de adsorbente, el tamaño y la morfología de la superficie. También depende de la concentración y estructura del sorbato (Bushra, Anees y Shahadat, 2017, p. 92).

Unos factores importantes que son necesarios comprender y diferenciar del proceso de adsorción son la concentración de adsorbato en el equilibrio ( $C_e$ ) y la capacidad de adsorción en el equilibrio ( $q_e$ ) representadas por las siguientes ecuaciones:

$$q_e = \frac{V}{M}(C_0 - C_e) \quad (1)$$

Donde, V, M,  $C_0$ ,  $C_e$  corresponden al volumen de la solución metálica (L), la cantidad de adsorbente (g), la concentración inicial (mg/L) y concentración en el equilibrio (mg/L) respectivamente.

Y

$$q_t = \frac{V}{M}(C_0 - C_t) \quad (2)$$

Corresponde a la capacidad de adsorción a un tiempo t. Únicamente al llegar al equilibrio se tiene que  $q_e = q_t$ .

La eficiencia de eliminación (RE%) de óxido de grafeno se puede calcular de la siguiente manera (Arias et al. 2020, p.4):

$$RE\% = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (3)$$

### ***1.3.2. Efecto del tiempo de contacto***

Este parámetro permite verificar el tiempo que toma al adsorbato llenar los sitios activos del adsorbente en la solución, es decir, el tiempo en que llegan al equilibrio y ya no se produce más adsorción. Este fenómeno, dependiendo del material utilizado como adsorbente, se produce durante los primeros minutos de reacción o durante las 2-4 horas de haber iniciado la reacción. Pasado este tiempo, analizando los otros parámetros, se considera el proceso de adsorción relativamente ineficiente (Núñez Niachimba, 2020).

### ***1.3.3. Efecto del pH***

El parámetro pH es una de las variables más importante para determinar la capacidad de adsorción, debido a que al disminuir el pH aumenta la presencia de iones  $H^+$  en la solución, y de la misma forma, al aumentar el pH aumenta la presencia de iones  $OH^-$ , afectando la carga superficial del adsorbente y el comportamiento que tendrá el contaminante en estas condiciones. Así, Ghasemi et al. (2019, p. 7). menciona este estudio permite determinar cómo afecta la ionización de las sustancias, en el proceso de adsorción (Ai, Zhang y Chen, 2011, p. 1522).

### ***1.3.4. Efecto de la temperatura y la termodinámica de adsorción***

Uno de los parámetros más importante que afecta el equilibrio de una reacción es la temperatura, principalmente porque afecta la solubilidad de los contaminantes (adsorbato) y movimiento de



las moléculas, por lo cual es necesario comprobar el proceso de adsorción a mínimo tres valores de temperatura diferentes.

Adicional, el estudio de la temperatura permite conocer varios parámetros termodinámicos que identifican la espontaneidad de la reacción y si esta es endotérmica o exotérmica, que se analizan a través de las siguientes ecuaciones (Ghasemi et al., 2019) (Ai, Zhang y Chen, 2011, p. 1521).:

$$K_d = \frac{C-Ce}{Ce} \chi \frac{V}{W} \quad (4)$$

$$\ln K_d = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (5)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (6)$$

Donde,  $K_d$  es el coeficiente de distribución,  $\Delta G$  la energía libre de Gibbs,  $\Delta H$  la entalpía,  $\Delta S$  entropía, R constante universal de gases y T la temperatura.

### 1.3.5. Cinética de Reacción

La cinética de reacción, permite conocer el comportamiento de adsorción en el tiempo, para los procesos de adsorción existen dos modelos: pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden.

**Pseudo primer orden:** La adsorción de la solución cambia con el tiempo y se correlaciona con los cambios de concentración de saturación y adsorción de adsorbente durante el tiempo (Ghasemi et al., 2019, p. 4).

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log } q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (7)$$

Donde  $q_e$  es el material adsorbido,  $q_t$  es el material adsorbido en tiempo t (mg/g) y  $k_1$  es la constante (1/min). La relación lineal corresponde a  $\text{Log}(q_e - q_t)$  vs  $t$ .

**Pseudo segundo orden:** expresa la tendencia de la tasa de adsorción con la capacidad de adsorción en la fase sólida (Ghasemi et al., 2019, p. 4).

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (8)$$

Donde  $q_e$  es el material adsorbido en el equilibrio (mg/g)  $q_t$  es el material adsorbido en tiempo t (mg/g) y  $k_2$  es la constante (g/mg.min). La relación lineal corresponde a  $\frac{1}{q_t}$  vs  $t$

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

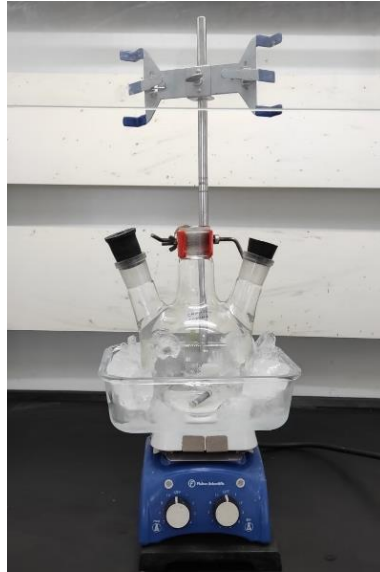
#### 2.1. Materiales y métodos

La metodología utilizada para la presente investigación está basada en bibliografía relacionada a adsorción de contaminantes en óxido de grafeno. La elección del método se realiza de acuerdo a la disponibilidad de reactivos y equipos en los laboratorios en la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior de Chimborazo.

#### 2.2. Síntesis de Óxido de grafeno (OG)

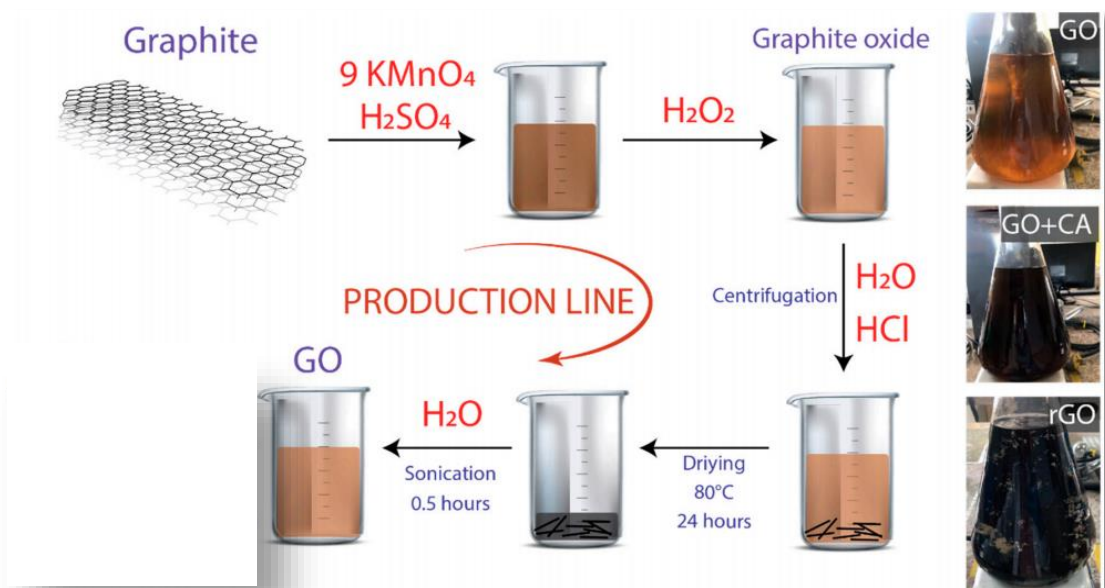
Se elige realizar la síntesis por el método de Hummers modificado (Fan et al. 2012, p. 274), los materiales utilizados se describen a detalle en (Tene et al., 2020, p. 3). que incluye: polvo de grafito (<150 um, 99,99%),  $H_2SO_4$  (ácido sulfúrico),  $KMnO_4$  (permanganato de potasio),  $HCl$  (ácido clorhídrico),  $H_2O_2$  (peróxido de hidrógeno) (Arias et al., 2020).

Se prepara el sistema como el mostrado en la Figura (3-1), al balón de aforo se añadió 3,0 g de polvo de grafito, seguido con agitación constante se vierte lentamente 70mL de  $H_2SO_4$  en un baño de hielo ( $T < 20^\circ C$ ). Dentro del mismo sistema se agrega 9,0 g de  $KMnO_4$  muy lentamente, debido a la naturaleza exotérmica de la reacción (coloración verde oscuro). Pasado unos 5min se empieza vertiendo gota a gota 150mL de agua destilada ( $60^\circ C > T < 90^\circ C$ ) siempre en constante agitación. A la solución se agregan 500mL de agua destilada, seguida de una adición lenta de 15 mL de  $H_2O_2$ . La solución resultante se agitó para cambiar el color de la solución de marrón oscuro a amarillento. Por centrifugación, la suspensión resultante de óxido de grafito se lavó con una solución de  $HCl$  para la eliminación de iones  $HSO_4^-$  y abundante agua destilada para ajustar el pH 6 (Arias et al., 2020, p. 3). Posteriormente, se obtuvo el OG mediante centrifugación y se secó en un desecador de vacío. (Fan et al. 2012, p. 273).



**Figura 3-2.** Equipo utilizado para la oxidación del polvo de grafito

Realizado por: Camino, C., 2022.



**Figura 4-2.** Proceso de síntesis de óxido de Grafeno

Fuente:(Tene et al., 2020).

### 2.2.1. Caracterización del OG

Para verificar la correcta síntesis del óxido de grafeno, se realiza un barrido en el Espectrofotómetro Uv-Vis en el rango de 200 nm a 500 nm para determinar el espectro correspondiente.

Para la caracterización del material se hace uso de la Espectroscopía IR de transformada de Fourier (FT-IR) utilizada para la caracterización de enlaces moleculares, en el rango de  $420\text{cm}^{-1}$  a  $4000\text{cm}^{-1}$ .

### 2.3. Adsorción de Cd en OG

El análisis de la adsorción de Cd, se realiza mediante espectrometría de absorción atómica (AAs) la cual mide la concentración de este metal a una longitud de onda de  $228,8\text{nm}$ . Para la lectura en el equipo se necesita una curva de calibración en concentraciones de  $0,02\text{ mg/L}$ ,  $0,04\text{ mg/L}$ ,  $0,06\text{mg/L}$ ,  $0,1\text{mg/L}$  y  $0,2\text{ mg/L}$  de Cd en una solución de agua acidulada ( $1\% \text{HNO}_3$ ).

Todos los experimentos de adsorción se realizaron en una incubadora con una velocidad de agitación de  $125\text{ rpm}$  hasta que el sistema alcanzó el equilibrio. Una vez completados los intervalos de tiempo preestablecidos, la dispersión se extrajo y se separó inmediatamente con la ayuda de una jeringa de  $0,45\text{mL}$  (Fan et al. 2012, p. 274).

Las muestras recogidas inicialmente en viales de  $5\text{mL}$  fueron diluidas por un factor de 50 con agua acidulada para poder conservarse y ser medidas en el rango del equipo de absorción atómica.

#### 2.3.1. Cinética y efecto del tiempo de contacto

Se agrega  $500\text{ mg}$  de GO a  $250\text{ mL}$  de solución Cd con una concentración de  $5\text{ mg L}^{-1}$  en un matraz Erlenmeyer de  $250\text{ mL}$ . La mezcla resultante se agita hasta  $6\text{ h}$  a  $125\text{ rpm}$ , considerando tres temperaturas diferentes ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $40\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $50\text{ }^\circ\text{C}$ )

**Tabla 1-2.** Diseño Experimental para la determinación de la cinética y el efecto del tiempo de contacto.

OG	Concentración de Cadmio	Volumen de SOL de Cd	Temperatura $^\circ\text{C}$
500mg O 0,5g	5ppm	250mL	25
			40
			50

Realizado por: Camino, C., 2022.

Se toman alícuotas de  $2\text{ mL}$  cada minuto, durante los 20 primeros minutos y luego a los  $25'$ ,  $30'$ ,  $35'$ ,  $40'$ ,  $45'$ ,  $50'$ ,  $60'$ ,  $70'$ ,  $80'$ ,  $90'$ ,  $120'$ ,  $150'$ ,  $180'$ ,  $210'$ ,  $240'$ ,  $270'$ ,  $300'$ ,  $330'$  y  $360'$ .

### 2.3.2. Efecto del pH

Preparar soluciones de 50mL con una concentración de 10ppm de Cadmio, fijar al pH inicial y para variar los valores desde 2 a 12 se utiliza soluciones de HCl (0,1 M) y NaOH (0,1 M) a temperatura ambiente, e inmediatamente se añade gradualmente 0,1 gramos de polvo de GO. Cada muestra se agita a 125 rpm hasta alcanzar el tiempo de equilibrio

**Tabla 2-2.** Diseño Experimental para la determinación del efecto del pH

<b>OG</b>	<b>Solución Cadmio (10ppm)</b>	<b>Temperatura</b>	<b>pH</b>
100mg O 0,1g	50 mL	25 °C	4
			6
			8
			10
			12

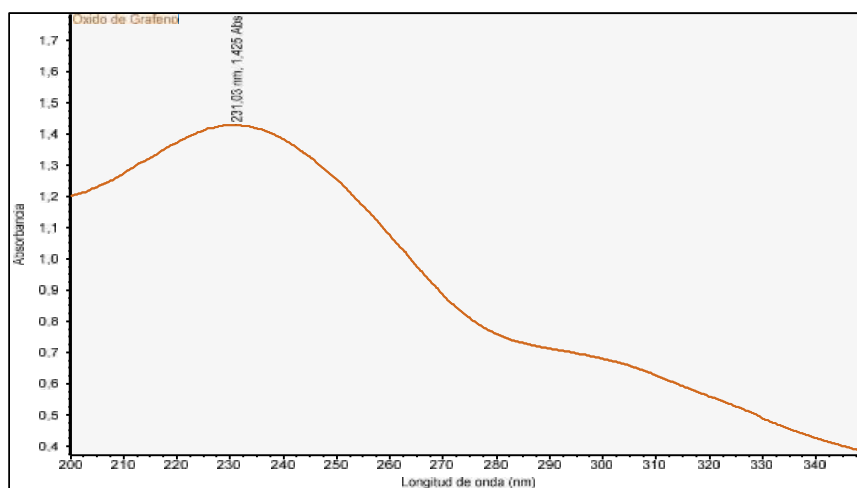
Realizado por: Camino, C., 2022.

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS

#### 3.1. Caracterización del OG y rOG.

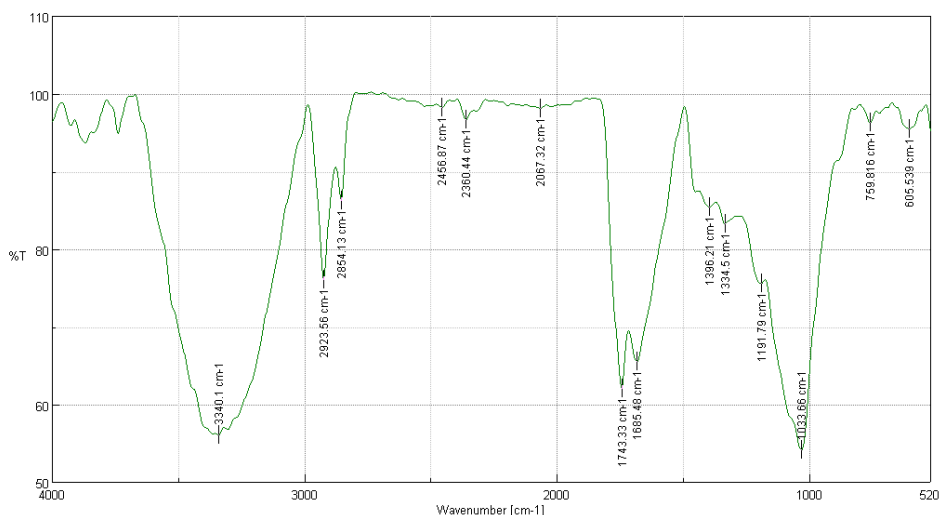
La caracterización del material sintetizado es importante para estar seguros de que dicho material en efecto se logró conseguir, de manera que existen muchas maneras en que este puede ser identificado, a través de sus vibraciones, adsorción de la luz, o estructura. Sin embargo, debido a que el proceso de obtención de óxido de grafeno es tomado de bibliografía y ya aparecen en varios artículos su caracterización, en el presente trabajo se tomará dos formas de identificarlo: mediante Espectrofotometría Uv-vis y Espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), la cual permitió identificar de forma cualitativa los grupos funcionales que se encuentran presentes en las muestras de OG midiendo que fracción de radiación infrarroja incidente ha sido absorbida.



**Figura 5-3.** Espectro UV-Vis del óxido de grafeno

Realizado por: Camino, C., 2022.

Al analizar el espectro Uv-vis se encuentra que este presenta dos picos de absorción a 231,03 nm y 304 nm, lo cual según Tene et al.( 2020, p. 5) se atribuyen a las transiciones  $\pi-\pi^*$  de C-C y  $n-\pi^*$  de los enlaces C=O, respectivamente.



**Figura 6-3.** Espectro FT-IR del OG

Realizado por: Camino, C., 2022 .

Según el espectro FT-IR obtenido (Ver Grafica 4-2) se tiene la presencia de múltiples picos los cuales al compararlos con la bibliografía indica la presencia de enlaces O-H, C=O, C=C, C-O Y C-O-C, como se muestra en la tabla Tabla 4-1, los cuales coinciden con los enlaces presentados dentro del material.

**Tabla 3-3.** Análisis de las vibraciones del Espectro FT-IR

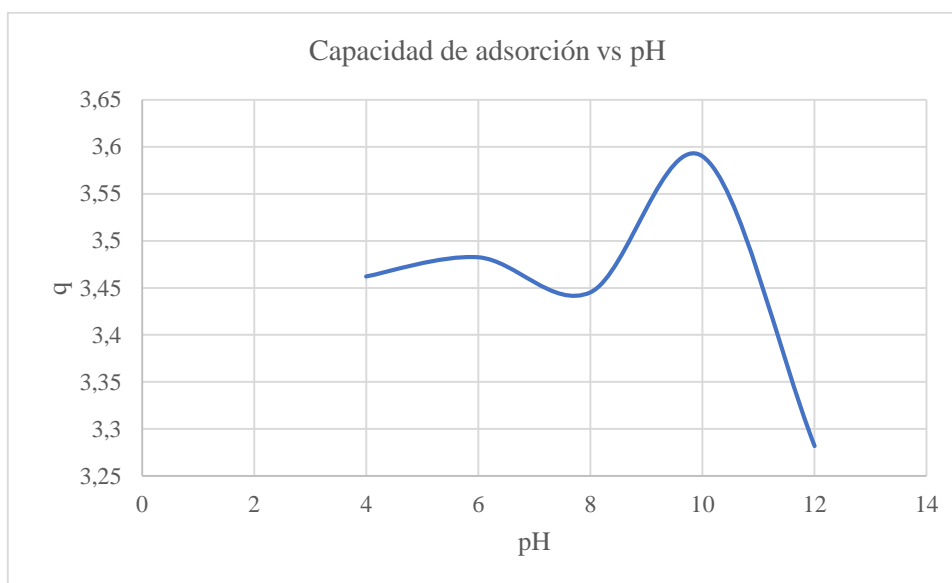
Wavenumber [cm <sup>-1</sup> ]	Vibraciones	(Ickecan, Zan y Nezir, 2017).	(Ickecan, Zan y Nezir, 2017, p. 3).
3340.1	O-H	3000 cm <sup>-1</sup> -3500 cm <sup>-1</sup>	3000 cm <sup>-1</sup> -3500 cm <sup>-1</sup>
1743.33	C=O	1740 cm <sup>-1</sup> -1720 cm <sup>-1</sup>	1700 cm <sup>-1</sup> -1750 cm <sup>-1</sup>
1685.48	C=C	1590 cm <sup>-1</sup> -1620 cm <sup>-1</sup>	1600 cm <sup>-1</sup> -1650 cm <sup>-1</sup>
1191.79	C-O	1230 cm <sup>-1</sup> -1250 cm <sup>-1</sup>	1280 cm <sup>-1</sup>
1033.66	C-O-C	1000 cm <sup>-1</sup>	1000 cm <sup>-1</sup>

Realizado por: Camino, C., 2022 .

## 3.2. Análisis del proceso de Adsorción

### 3.2.1. Efecto del pH

Para investigar el efecto del pH sobre la capacidad de adsorción del Cd en OG, los experimentos se llevaron a cabo a cinco valores de pH diferentes (4, 6, 8, 10, 12) a temperatura ambiente, concentración de 10 mg/L de adsorbato, volumen de 50mL y 1,0 mg de OG. Los resultados se muestran en la Gráfica 4-1.



**Gráfico 1-3.** Efecto del pH sobre la capacidad de adsorción

Realizado por: Camino, C., 2022 .

En la primera zona de la Gráfica 4-1., correspondiente a un medio ácido, la capacidad de adsorción se mantiene en un promedio de 3,45 aproximadamente. En esta zona caracterizada por la presencia de protones H<sup>+</sup> se producirá una competencia con el ión metálico Cd para producirse el intercambio de iones con la superficie del adsorbente, el cual, como observamos en la Figura 2-1, presenta en su estructura una gran cantidad de grupos hidroxilos y carbonilos.

Ghasemi et al.(2019, p. 8) en su estudio de adsorción de iones de mercurio de una solución acuosa sintética utilizando SWCNT funcionalizados con polidopamina para el efecto del pH indica la presencia de algunas reacciones, las cuales debido a la naturaleza del material adsorbente y el metal se las puede considerar que suceden de manera similar en este proceso, donde se tiene:



En estas reacciones se evidencia los procesos que se dan a medida que el pH de las reacciones va aumentando, en primer lugar, en pH ácido, el ión cadmio reaccionará con la superficie del óxido



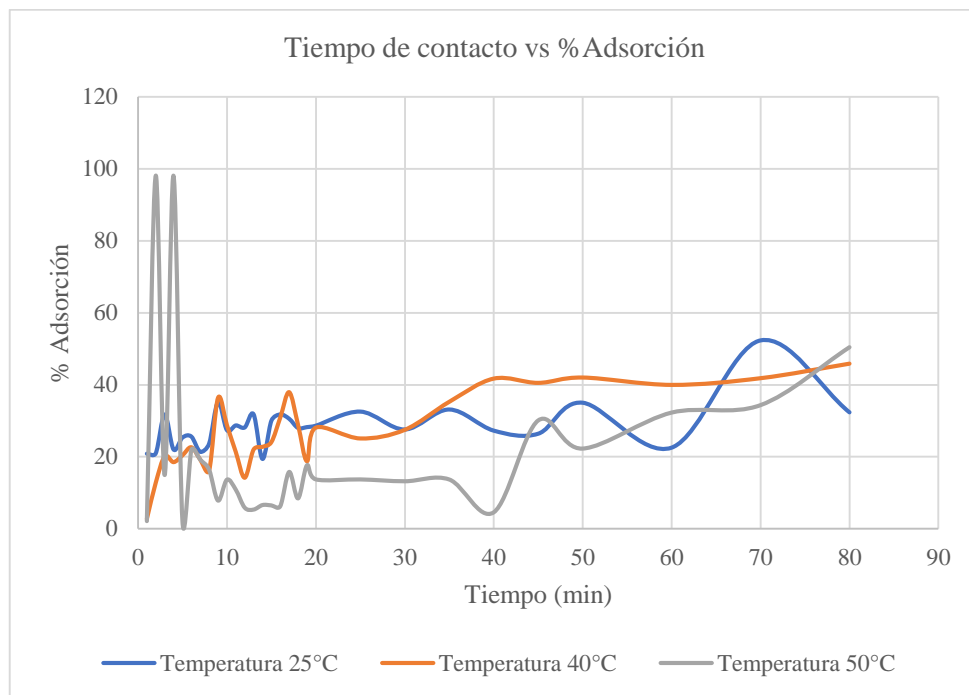
de grafeno, la cual tiene una alta presencia de grupos hidroxilos y carbonilos produciéndose además un intercambio iónico con presencia de H<sup>+</sup>. Por otro lado, a pH básico la presencia de iones OH<sup>-</sup> en solución aumentará, los cuales se encargarán de consumir los H<sup>+</sup>, sin embargo, en esta zona se corre el riesgo de una poca adsorción como se observa en la figura a medida que el pH aumenta, esto debido a que el Cd tiende a formar complejos con los grupos hidroxilo (OH) presentes en la solución (12)(13) Ghasemi et al.(2019, p. 8). Además, considerando la formación del hidróxido de cadmio y su solubilidad  $5,90 \times 10^{-15}$ , este va a tender a precipitar hacia el fondo de la solución de manera que el cadmio no podrá ser adsorbido por el óxido de grafeno (Zumbado, 2002, p. 404).



De acuerdo a las discusiones mencionadas, y el comportamiento que presenta el cadmio al variar el pH se concluye que no se puede determinar la adsorción máxima de Cd sobre óxido de grafeno debido a que a pH bajo no se produce una buena adsorción y a pH alto, el cadmio tiene a precipitar formando complejos.

### 3.2.2. *Efecto del Tiempo de contacto*

De acuerdo a los tres experimentos para determinar el tiempo de contacto variando la temperatura, se observa que no logran alcanzar un equilibrio estable incluso después de las 2 horas de reacción, ya que los valores de adsorción en el tiempo aumentan y disminuyen constantemente. (Brown et al., 2004) menciona que todas las reacciones van a tender a un estado de equilibrio, en donde tanto la formación de productos y reactivos sucedan a la misma velocidad. En estudios realizados de adsorción se establece como tiempo de reacción para alcanzar el equilibrio los 60 minutos en promedio y hay ciertos contaminantes como los colorantes que alcanzan este equilibrio en mucho menor tiempo como lo menciona (Figuroa, Moreno y Angelina, 2015, p. 117) aunque esto dependerá de la naturaleza del material adsorbente y del material que será adsorbido, sin embargo, en este caso, al no llegar a un estado estable en la reacción tomaremos como referencia a los 80 minutos de reacción, debido a la toma de muestras hasta este valor es mucho más cercano y se puede tener un análisis más aproximado para analizar que sucede con la temperatura y cinética de reacción. Este proceso continuo de adsorción-desorción que se observa en el tiempo, explica (Skoog et al., 2015) que se debe a un cambio de la concentración en el equilibrio, por lo que el sistema siempre buscará compensar la cantidad de iones en la solución y en el material adsorbente, en dónde también otros factores como la temperatura influyen tanto en la estabilidad como en la rapidez con que este fenómeno se produce o alcance equilibrio.



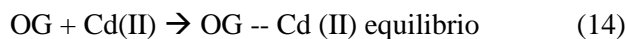
**Gráfico 2-3.** Efecto del tiempo vs el % de Adsorción

Realizado por: Camino, C., 2022 .

### 3.2.3. Cinética

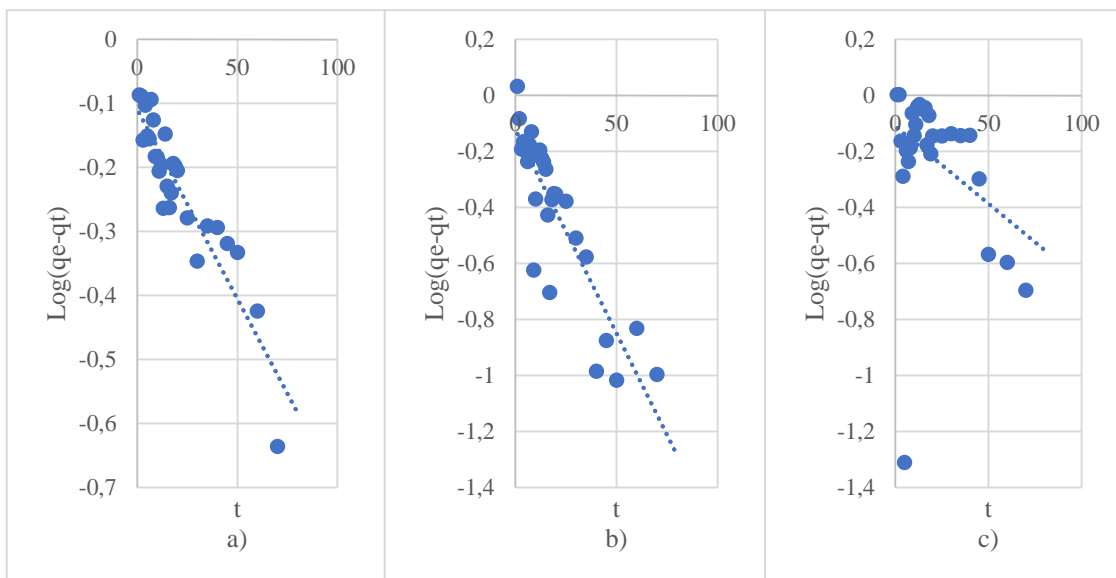
La cinética de una reacción es indispensable para evaluar la eficiencia de una reacción química, de igual manera, para el proceso fisicoquímico de adsorción en la cual permitirá conocer la velocidad a la cual este fenómeno ocurre y la manera cómo ocurre (Logan, 200d. C.).

Debido a que el proceso de adsorción no corresponde a una reacción meramente química, ya que no se producen enlaces fuertes sino más bien débiles permitirá recuperar el contaminante del material adsorbente mediante otro proceso conocido como desorción, por ende, si deseáramos escribirlo similar a una reacción química, lo que se tendría sería lo siguiente:



dónde,  $OG - Cd(II)$  es el material adsorbente con todos sus sitios activos llenos del ión cadmio, formando una especie de complejo con los enlaces que va formando con el agua, los iones de cadmio y la misma agua.

De acuerdo a la cinética y después de haber realizado los cálculos respectivos se observa que la cinética de pseudo primer orden que se obtuvo (ver Gráfica 4-3) no se ajusta de manera precisa para ninguna de las tres temperaturas, donde se observa que a 25°C , 40°C y 50°C tienen una linealidad menor al 0,7 por lo que este modelo cinético sería el menos ajustable.

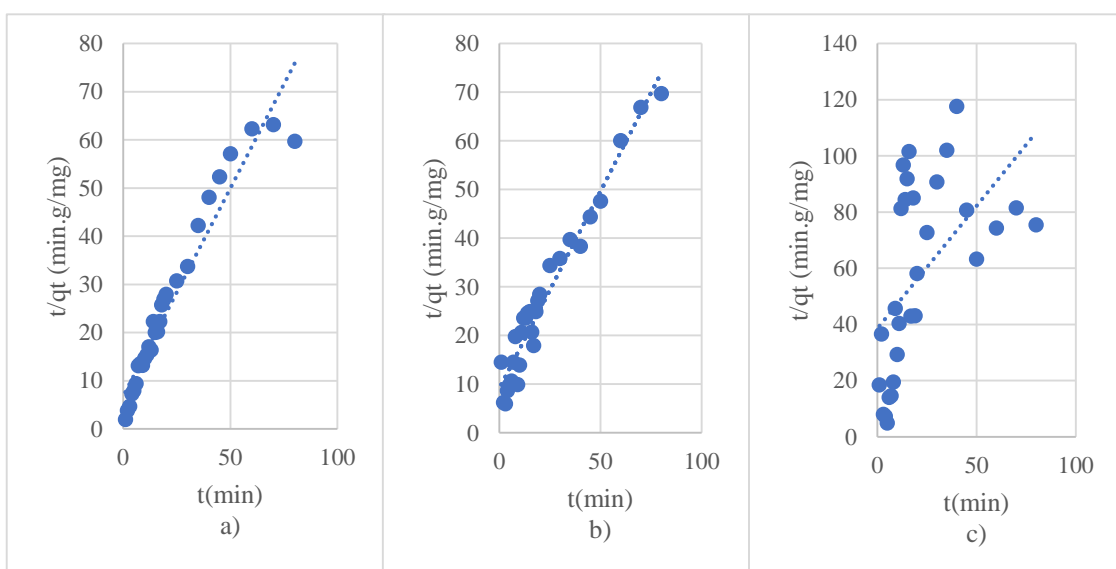


**Gráfico 3-3.** Cinética de pseudo primer orden a) 25°C b) 40°C c) 50°C

Realizado por: Camino, C., 2022 .

Al hacer el ajuste a la cinética de pseudo segundo orden de los valores, se observa una mejor linealidad (Ver Gráfico 4-4) para las temperaturas de 25°C y 40°C, y para la 50°C se conserva el mismo estado de dispersión de datos. Al verificar los valores de  $r^2$  en efecto corresponden a valores de 0,93 y 0,95 para 25°C y 40°C respectivamente.

Los valores adquiridos para determinar la cinética y sus parámetros correspondientes a cada uno de los modelos, las capacidades de adsorción de acuerdo a cada modelo y experimento se muestran en la Tabla 4-2.



**Gráfico 4-3.** Cinética de pseudo segundo orden a) 25°C b) 40°C c) 50°C

Realizado por: Camino, C., 2022 .

**Tabla 4-3.** Comparación de los parámetros cinéticos de la adsorción de Cd en OG

<b>Temperatura</b>	<b>25°C</b>		<b>40°C</b>		<b>50°C</b>	
<b>q<sub>e</sub> (exp) (mg g<sup>-1</sup>)</b> 1)	0,80905		1,1474		1,06105	
<b>Orden de Cinética</b>	<b>Pseudo primer orden</b>	<b>Pseudo Segundo orden</b>	<b>Pseudo primer orden</b>	<b>Pseudo Segundo orden</b>	<b>Pseudo primer orden</b>	<b>Pseudo Segundo orden</b>
<b>q<sub>e</sub>(cal) (mg g<sup>-1</sup>)</b>	1,024	0,835	0,718	1,242	0,989	0,895
<b>k</b>	2,314	0,448	0,244	0,062	0,114	0,030
<b>R<sup>2</sup></b>	0,127	0,876	0,730	0,893	0,539	0,137

Realizado por: Camino, C., 2022 .

Al comparar únicamente los valores de R<sup>2</sup> se puede conocer que en todos los experimentos se adecua mejor la cinética de pseudo segundo orden, debido a que el valor de este parámetro es mayor. A pesar de esto, también se realiza una comparación con los valores de q<sub>e</sub>, en la cual el valor de la capacidad de adsorción en el equilibrio experimental (q<sub>e exp</sub>) debe ser igual o cercano al valor de la capacidad de adsorción en el equilibrio calculada (q<sub>e cal</sub>), confirmando que en efecto estos valores son bastantes cercanos como se muestra en la Tabla 4-2.

Que siga una cinética de pseudo segundo orden indica que existen interacciones fisicoquímicas entre el óxido de grafeno que se encuentra en fase sólida y el cadmio, el cual se encuentra en solución (D. Robati Ghasemi et al., 2019, p. 9). Ghasemi et al.( 2019, p. 9) menciona también que este tipo de modelo cinético se presenta en soluciones líquidas, lo cual es coherente a nuestro caso.

Verificando los valores de las constantes de la cinética de pseudo segundo orden, se observa un comportamiento decreciente a medida que la temperatura se ve en aumento, M. Hadavifar citado en Ghasemi et al.(2019, p. 9) menciona que se debe a la formación de una monocapa de iones metálicos sobre la superficie del adsorbente, óxido de grafeno.

Sin embargo, si nos fijamos en la tercera reacción a 50°C aparece un caso bastante peculiar, ya que ni en cinética de pseudo primer orden ni en cinética de pseudo segundo orden se acopla de manera asertiva, ya que tanto el valor de regresión lineal como el valor de q<sub>e</sub> no son suficientemente aceptables para concluir que pertenece a una de estos dos tipos de pseudo ordenes, esto debido principalmente a que a esta temperatura se observa los cambios más bruscos en la capacidad de adsorción lo cual no ha permitido tener una linealidad en los datos, el efecto que la temperatura ha causado en esta reacción, la analizaremos en el apartado siguiente.

### 3.2.4. *Temperatura*

Como se explica anteriormente, la temperatura es un factor importante que afecta la velocidad de una reacción, es decir la cinética, lo cual se observa claramente en el Grafico 4-2, en donde dependiendo de la temperatura la capacidad de adsorción varia considerablemente. El hallazgo demostró que la reacción de adsorción de cadmio en óxido de grafeno no logra alcanzar un equilibrio debido a la constante adsorción y desorción que se produce a través del tiempo, la formación de complejos, etc.

Con la constante variación de datos, se observa que a temperatura ambiente la adsorción máxima que alcanza es del 52,3% relativamente bajo a comparación de otros estudios que demuestran que la temperatura ambiente es uno de los parámetros ideales para una buena adsorción (Fan et al., 2012; Fernandes et al., 2010; Ai, Zhang y Chen, 2011), añadido que esta capacidad de adsorción no logra mantenerse en el tiempo, la temperatura de 25°C no parece ser una buena condición de reacción para este proceso.

A temperatura de 40°C se tiene un análisis similar a lo que ocurre a 25°C pero con una capacidad de adsorción menor, llega apenas a los 45,98%, sin embargo, si analizamos el coeficiente de regresión lineal (Tabla 4-2) a esta temperatura se tienen los valores menos dispersos.

Finalmente, a 50°C la capacidad de adsorción es bastante alta llegando a 98,04% de capacidad, sin embargo, esto sucede durante los primeros minutos de reacción para luego decaer de forma drástica hasta un 2%, seguido de valores bastante aleatorios que se ven reflejados en una alta dispersión de datos, indicando que a esta temperatura, la estabilidad de la reacción es muy baja. Ghasemi et al.(2019, p. 8) menciona que a temperaturas bajas los sitios de adsorción son muy activos lo que indicaría que a temperatura ambiente se tendría el mejor proceso de adsorción, sin embargo, los datos obtenidos de la adsorción de cadmio en óxido de grafeno a 25°C no es eficiente debido a la baja capacidad de adsorción y sobre todo porque esta capacidad no logra mantenerse estable en el tiempo, llegando a presentar valores muy bajos durante el proceso.

La energía libre de Gibbs, que indica la naturaleza espontánea del proceso, no se calcula debido a que los datos experimentales no presentan una linealidad adecuada, sin embargo (Ghasemi et al., 2019, p. 9) menciona que este debería ser negativo, ya que los procesos de adsorción son procesos de carácter espontáneo y, experimentalmente a las condiciones antes señaladas se observó la disminución de la concentración de Cd a pesar de que este era disperso.

Por otro lado, el valor de la entalpía ( $\Delta H$ ) tendría un valor negativo ya que como lo mencionan Arias et al.( 2020, p. 13)., Fan et al.( 2012, p. 277)., Ghasemi et al.( 2019, p. 9)., el aumento de temperatura desfavorecería este proceso, a pesar que a 50°C se logró una capacidad de adsorción alta, esta no se mantiene y decae en valores bastante bajos y bastante dispersos con mayor dificultad a alcanzar el equilibrio.

Finalmente, se tendría un valor negativo en la entropía ( $\Delta S$ ) ya que como lo mencionan (T.A. Saleh citado en Ghasemi et al., 2019, p. 9) un valor bajo en la entropía señalaría poca afinidad entre el adsorbato y adsorbente debido a la liberación de moléculas de agua en el momento de la reacción de intercambio iónico entre el ión metálico y la superficie de los grupos funcionales adsorbentes, el cual sería el caso del sistema.

## CONCLUSIONES

- La síntesis del Oxido de Grafeno resultó ser bastante económico y se confirmó que se trataba de este material a través del análisis en Uv-vis que indica la presencia de picos de adsorción a 233 nm y 304 nm característicos del OG en este espectro, así mismo la presencia de picos a  $3340\text{ cm}^{-1}$ ,  $1743\text{ cm}^{-1}$ ,  $1685\text{ cm}^{-1}$ ,  $1191\text{ cm}^{-1}$  y  $1033\text{ cm}^{-1}$  en el espectro FT-IR que corresponde al material. Sin embargo, respecto a la capacidad de adsorción con el cadmio no indicó características eficientes, debido a que presenta aleatoriedad para llegar al equilibrio en la reacción presentado una continua adsorción y desorción.
- Los resultados del análisis de pH indicaron que a valores bajos existe competencia entre el ion Cd y el ion H<sup>+</sup> por los sitios activos, y a valores de pH altos hay la posible formación de complejos insolubles como el CdOH que presenta un Kps bastante bajo haciendo que el cadmio precipite e impidiendo la adsorción por lo que este parámetro se vuelve ambiguo.
- La temperatura resulta ser otro de los parámetros que afecta a la capacidad de reacción, ya que dependiente de esta se obtuvo más o menos capacidad de adsorción, sin embargo, pierde su importancia en este proceso debido a que en ninguno de los casos esa capacidad de adsorción logra mantenerse. De manera teórica, se tiene que este proceso es exotérmico, es decir, libera energía, pero no es espontánea por lo que tendrá dificultades para que esta se dé.
- Finalmente, el análisis cinético muestra que el modelo de pseudo segundo orden es el que mejor se ajusta, a pensar que la dispersión es alta y esta conclusión podría resultar ambigua, se tendría la formación de una monocapa con los iones de Cd sobre la superficie del material adsorbente, óxido de grafeno.

## RECOMENDACIONES

- Se propone realizar pruebas con la variación de la concentración del adsorbato en un rango menor y mayor de cadmio, con la finalidad de verificar si este parámetro nuevo afecta el proceso de adsorción y existe cambios sea en la cinética, tiempo de equilibrio, etc.
- Se sugiere, además, incluir el parámetro cantidad de adsorbente, para analizar el comportamiento del óxido de grafeno como adsorbente en este proceso, manteniendo constante todos los otros parámetros, pH, cantidad de adsorbato, temperatura, revoluciones.
- Se recomienda hacer un análisis más amplio de la caracterización del óxido de grafeno, mediante otras técnicas como la espectroscopía de Rayos X de dispersión de energía y difracción de rayos x para la caracterización de posibles elementos sobre el material, lo cual aportará información acerca de este adsorbente.
- Para evitar la contaminación y pérdida de cadmio el cual después del proceso queda adsorbido en el óxido de grafeno, se recomienda, utilizar una técnica de desorción para recuperar el material y si es necesario reutilizarlo o desecharlo de la manera correcta.
- Finalmente, se sugiere la funcionalización del oxido de grafeno para probar el proceso de adsorción de cadmio como contaminante, ya que se ha reportado que la funcionalización de los materiales adsorbentes mejora sus propiedades haciendo que se produzca una mejor eficiencia.



## GLOSARIO

**Adsorbato:** Refiere a un líquido, gas o vapor que ha sido adsorbido. Se prevé una gran aplicación atribuida a compuestos orgánicos volátiles (COV) y especialmente a disolventes orgánicos en concentraciones diluidas en el aire (Feal Veira, 2005, p. 250).

**Adsorbente:** Se describe como el medio sólido en donde se da lugar la adsorción. El adsorbente que más predomina en procesos fisicoquímicos es el Carbón Activado, pero se ha demostrado que también el Óxido de Grafeno tiene una gran actividad adsorbente (Feal Veira, 2005, p. 251).

**Nanomaterial:** Es uno de los principales productos de la nanotecnología y puede llegar a presentarse en forma de nanopartículas, nanotubos o nanofibras; a una escala menor de 100 nanómetros de tamaño en al menos una dimensión (CCRSERI, 2009).

**Cinética de Reacción:** La cinética de una reacción refiere a la rapidez o velocidad en la que esta ocurre, tomando en cuenta factores como la concentración de reactivos, temperatura, catalizador, y el estado físico de los reactivos presentes en el proceso (Gómez, González y Viruela, 2010).

**Estándar:** Se define como una disolución de concentración exactamente conocida utilizada para detectar errores analíticos en las determinaciones analíticas cualitativas y cuantitativas (Skoog et al., 2015).

**Termodinámica:** es la rama de la Ciencia que describe el comportamiento de la materia y la transformación entre las diferentes formas de energía a escala macroscópica, escala humana o mayor. La Termodinámica describe un sistema de interés en términos de sus propiedades de conjunto. Solamente son necesarias unas cuantas variables para describir el sistema y son, generalmente, accesibles a través de medidas (Engel, Reid y Hehre, 2006, p. 1).

**Temperatura:** En Termodinámica, la temperatura es la propiedad de un sistema que determina si el sistema está en equilibrio térmico con otros sistemas o el medio que lo rodea (Engel, Reid y Hehre, 2006, p. 3).

**Sitio activo:** el sitio activo debe tener la conformación correcta, con los grupos funcionales de las cadenas laterales necesarios en las posiciones correctas. Las proteínas conjugadas deben tener los grupos prostéticos correctos y las proteínas multicadena deben tener la combinación correcta de los péptidos individuales (L.G. Wade, 2012, p. 1191)

**Nanoescala:** el término nanoescala se aplica a dimensiones en el orden de 1-100 nanómetros (1 nm  $5 \cdot 10^{-9}$  m), y una meta de la nanotecnología es desarrollar dispositivos útiles en nanoescala (nanodispositivos) (Carey y Giuliano, 2014, p. 416)

**Hibridación:** es el fenómeno por el cual uno de los orbitales es promovido a un orbital superior de tal manera que se producen orbitales equivalentes. Aunque en el proceso de hibridación hace falta energía para promover el electrón, la energía necesaria queda más que compensada por la disminución de energía que acompaña a la formación del enlace (ASmith y Hashemi, 2014, p. 32)

## BIBLIOGRAFÍA

**AI, L.ZHANG, C.y CHEN, Z.**, Removal of methylene blue from aqueous solution by a solvothermal-synthesized graphene/magnetite composite. *Journal of Hazardous Materials* [en línea], vol. 192, no. 3, 2011, pp. 1515-1524. ISSN 03043894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2011.06.068. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.06.068>.

**ARIAS ARIAS, F.E.BENEDUCI, A.CHIDICHIMO, F.FURIA, E.y STRAFACE, S.**, Study of the adsorption of mercury (II) on lignocellulosic materials under static and dynamic conditions. *Chemosphere* [en línea], vol. 180, 2017, pp. 11-23. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2017.03.137. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.137>.

**ARIAS, F.A.GUEVARA, M.TENE, T.ANGAMARCA, P.MOLINA, R.VALAREZO, A.SALGUERO, O.GOMEZ, C.V.ARIAS, M.y CAPUTI, L.S.**, The adsorption of methylene blue on eco-friendly reduced graphene oxide. *Nanomaterials*, vol. 10, no. 4, 2020. ISSN 20794991. DOI 10.3390/nano10040681.

**ASMITH, W.F. y HASHEMI, J.**, 2014. *Fundamentos Ciencia e Ingenieria Materiales* [en línea]. Cuarta. México: McGraw Hill. ISBN 9701056388. Disponible en: <https://chirinosilvaroger.files.wordpress.com/2012/05/fundamentos-de-la-ciencia-e-ingenieria-de-materiales-4ta-edicion-3b3n-william-f-smith-javad-hashemi.pdf>.

**BARRERA MOLINA, C.J. y GRANDA RIVERA, R.A.**, Evaluación de la remoción de plomo y mercurio de aguas sintéticas utilizando zeolitas hidrotermales sintetizadas en pruebas de laboratorio y propuesta de diseño sistemas de adsorción industriales. , 2020.

**BERNER BELTRÁN, S.E.**, 2017. *Hidróxidos laminares para tratamientos de residuos orgánicos en agua y el efecto de la incorporación de óxido de grafeno*. S.l.: Universidad de Chile.

**BROWN, T.L.LEMAY, E.BURSTEN, B.y BURDGE, J.**, 2004. *Química La ciencia central*. Novena. México: Person Education de México, S.A. ISBN 9702604680.

**BUSHRA, R.ANEES, A.y SHAHADAT, M.**, Mechanism of Adsorption on Nano materials. *Advanced Environmental Analysis: Applications of Nanomaterials*, vol. 1, no. 9, 2017.

**CARBONEL, D.**, Cadmium, Copper and Lead Adsorption on Natural and Modified Bentonite, Kaolin and Zeolite: A Review of Process Parameters, Isotherms and Kinetics. *Ingeniería* [en línea], vol. 23, no. 3, 2018, pp. 17. ISSN 2344-8393. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/inge/v23n3/0121-750X-inge-23-03-00252.pdf>.

**CAREY, F.A. y GIULIANO, R.M.**, 2014. *Química Orgánica*. novena edi. México: McGRAW-HILL/Interamericana editores, S.A. de C.V. ISBN 9786071512109.

**CARREÑO MENDOZA, A.L.LUCAS VIDAL, L.R.HURTADO, E.A.BARRIOS-MAESTRE, R.y SILVA-ACUÑA, R.**, Sistema de tratamiento de aguas superficiales para consumo humano en la microcuenca del Río Carrizal, Ecuador. *La Técnica: Revista de las Agrociencias*, vol. 11, 2019, pp. 76-87. ISSN 2477-8982. DOI 10.33936/la\_tecnica.v0i21.1869.

**CCRSERI**, 2009. Nanomateriales. *Public Health* [en línea]. Disponible en: [https://ec.europa.eu/health/scientific\\_committees/opinions\\_layman/nanomaterials/es/about-nanomaterials.htm#7](https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/nanomaterials/es/about-nanomaterials.htm#7).

**COVARRUBIAS, S.A. y PEÑA CABRIALES, J.J.**, Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 33, 2017, pp. 7-21. ISSN 01884999. DOI 10.20937/RICA.2017.33.esp01.01.

**DELGADO, J.AYALA, D.y PÁEZ, H.**, Sistema de tratamiento para mejorar la calidad de aguas de drenaje de pasivos ambientales mineros en la cuenca del río Puyango ( Ecuador ). *Sociedad Geológica de España*, 2018, pp. 63-66.

**DIMAS RIVERA, G.L.**, Estudio de la interacción de metales pesados (Pb, Cd, Zn y Cr) en solución en el proceso de biosorción por tres tipos de BIOMASA. *Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León*, 2011.

**ENGEL, T.REID, P.y HEHRE, W.**, 2006. *Química Física*. Madrid: Person Educación. ISBN 9788483226995.

**FAN, L.LUO, C.LI, X.LU, F.QIU, H.y SUN, M.**, Fabrication of novel magnetic chitosan grafted with graphene oxide to enhance adsorption properties for methyl blue. *Journal of Hazardous Materials* [en línea], vol. 215-216, 2012, pp. 272-279. ISSN 03043894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2012.02.068. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.02.068>.

**FEAL VEIRA, A.**, 2005. Adsorbedores de gases (I). . S.l.:

**FERNANDES, A.N.ALMEIDA, C.A.P.DEBACHER, N.A.y SIERRA, M.M.D.S.**, Isotherm and thermodynamic data of adsorption of methylene blue from aqueous solution onto peat. *Journal of Molecular Structure* [en línea], vol. 982, no. 1-3, 2010, pp. 62-65. ISSN 00222860. DOI 10.1016/j.molstruc.2010.08.006. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2010.08.006>.

**FIGUEROA, D.MORENO, A.y ANGELINA, A.**, Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 14, no. 26, 2015, pp. 105-120. ISSN 16923324. DOI 10.22395/rium.v14n26a7.

**FIGUEROA GUAYLLAS, F.P.**, Remediación de la contaminación de agua por metales pesados con el uso de celulosa de la biodiversidad de Ecuador. *Bachelor's thesis, Universidad de Investigación de Tecnología Experimental Yachay*, 2020.

**GAGO, I.MOLINA, I.LEÓN, G.y MIGUEL, B.**, Introducción al estudio de las propiedades antibacterianas del grafeno. *Revista de Pensamiento Estratégico y Seguridad CISDE*, 2016, pp. 87-94.

**GARCÉS GUAMBA, N.y MORILLO MORALES, B.**, 2019. *ESTUDIO DE LA ADSORCIÓN DE CINCO MEDIANTE EL USO DEL COMPÓSITO MAGNETITA/ÓXIDO DE GRAFENO PARA SU REMOCIÓN EN AGUAS SINTÉTICAS*. S.l.: Escuela Politécnica Nacional.

**GARCÍA, P.E.P. y CRUZ, M.I.A.**, Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, vol. 17(3), 2012, pp. 199-205.

**GEETHA BAI, R.MUTHOOSAMY, K.MANICKAM, S.y HILAL-ALNAQBI, A.**, Graphene-based 3D scaffolds in tissue engineering: fabrication, applications, and future scope in liver tissue engineering. *International journal of nanomedicine*, vol. 14, 2019, pp. 5753-5783. ISSN 1178-2013 (Electronic). DOI 10.2147/IJN.S192779.

**GHASEMI, S.S.HADAVIFAR, M.MALEKI, B.y MOHAMMADNIA, E.**, Adsorption of mercury ions from synthetic aqueous solution using polydopamine decorated SWCNTs. *Journal of Water Process Engineering*, vol. 32, no. September, 2019. ISSN 22147144. DOI 10.1016/j.jwpe.2019.100965.

**GÓMEZ, C.GONZÁLEZ, R.y VIRUELA, R.**, Cinética Química. *Universitat Politecnica de Valencia* [en línea], 2010. Disponible en: [http://ocw.uv.es/ciencias/1-1/teo\\_cinetica\\_nuevo.pdf](http://ocw.uv.es/ciencias/1-1/teo_cinetica_nuevo.pdf).

**GORDÓN, F.**, Aplicabilidad del composito goethita/ óxido de grafeno reducido para remover metales pesados de aguas contaminadas. *Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador*, vol. 0, 2017, pp. 128.

**ICKECAN, D.ZAN, R.y NEZIR, S.**, Eco-Friendly Synthesis and Characterization of Reduced Graphene Oxide. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 902, no. 1, 2017, pp. 8-12. ISSN 17426596. DOI 10.1088/1742-6596/902/1/012027.

**JIMÉNEZ CASTILLA, L.**, El Cadmio, un gran desconocido. *Revista de Química de la Universidad Pablo de Olavide* [en línea], no. 9, 2013, pp. 133-135. ISSN 2173-0903. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/extart?codigo=4178674>.

**L.G. WADE, J.**, 2012. *Química Organica*. séptima ed. México: Person Education de México, S.A.

**LOGAN, S.R.**, 200d. C. *Fundamentos de Cinética Química*. Madrid: Addison Wesley Longman de México S.A de C.V.

**MARSHALL, B.G.VEIGA, M.M.KAPLAN, R.J.ADLER MISERENDINO, R.SCHUDEL, G.BERGQUIST, B.A.GUIMARÃES, J.R.D.SOBRAL, L.G.S.y GONZALEZ-MUELLER, C.**, Evidence of transboundary mercury and other pollutants in the Puyango-Tumbes River basin, Ecuador-Peru. *Environmental Science: Processes and Impacts*, vol. 20, no. 4, 2018, pp. 632-641. ISSN 20507895. DOI 10.1039/c7em00504k.

**MARTÍNEZ OROZCO, R.D.**, 2015. *Funcionalización de óxido de grafeno con nanopartículas de paladio y su aplicación en la detección de hidrógeno* [en línea]. S.l.: Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. Disponible en: <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/bitstream/handle/11627/3044/TDIPICYTM3F82015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

**MERO, M.PERNÍA, B.RAMÍREZ-PRADO, N.BRAVO, K.RAMÍREZ, L.LARRETA, E.y EGAS, F.**, Concentration of cadmium in water, sediments, eichhornia crassipes and pomacea canaliculata in the Guayas (Ecuador) river and tributaries. *Revista Internacional de*

*Contaminacion Ambiental*, vol. 35, no. 3, 2019, pp. 623-640. ISSN 01884999. DOI 10.20937/RICA.2019.35.03.09.

**NÚÑEZ NIACHIMBA, A.**, 2020. *DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE ADSORCIÓN DE MERCURIO UTILIZANDO ÓXIDO DE GRAFENO REDUCIDO PARA AFLUENTES CONTAMINADOS*. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

**OLIVA, P.-P.FREDY, C.-C.EDGARDO, M.-F.y ROBERTO, F.-M.**, Carbones activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de cadmio y plomo. *Rev. Acad. Colomb* [en línea], vol. 35, no. 136, 2011, pp. 387-396. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-39082011000300012](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082011000300012).

**ORGANIZATION WORLD HEALTH (OMS)**, 2004. *Guidelines for drinking-water quality*. S.l.: World Health Organization. ISBN 9241546387.

**PINOS N, R.E. y SILVA Y, J.E.**, 2009. *Química Ambiental*. Riobamba: Daguerrotipo arte digital.

**POMA HUAMÁN, L.G.**, Comparación de materiales compuestos a base de óxido de grafeno reducido para remover plomo de efluentes. , 2017.

**RAMÓN DE LOS SANTOS, C.BARAJAS FERNÁNDEZ, J.PÉREZ HERNÁNDEZ, G.HERNÁNDEZ RIVERA, M.Á.y DÍAZ FLORES, L.L.**, Adsorption of copper (II) and cadmium (II) in aqueous suspensions of biogenic nanostructured CaCO<sub>3</sub>. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* [en línea], vol. 58, no. 1, 2019, pp. 2-13. ISSN 21730431. DOI 10.1016/j.bsecv.2018.05.003. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.05.003>.

**SIERRA, I.PEREZ, D.y MORANTE, S.**, 2008. *Prácticas de análisis instrumental* [en línea]. S.l.: Dykinson. ISBN 9788498496444. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/34223>.

**SKOOG, D.A.WEST, D.M.HOLLER, J.y CROUCH, S.R.**, 2015. *Química Analítica*. Novena. México, D.F: Cengage Learning Editors, S.A de C.V. ISBN 9780495558286.

**TENE, T.USCA, G.T.GUEVARA, M.MOLINA, R.VELTRI, F.ARIAS, M.CAPUTI, L.S.y GOMEZ, C.V.**, Toward large-scale production of oxidized graphene. *Nanomaterials*, vol. 10, no. 2, 2020, pp. 1-11. ISSN 20794991. DOI 10.3390/nano10020279.

**TOVAR MARTÍNEZ, E.**, 2017. *Síntesis y Caracterización de Óxido de Grafeno reducido y dopado con N mediante un Proceso Solvotérmico*. S.I.: Instituto Potosino de Investigación científica y tecnológica, A.C.

**VALLE, P. y FLORENTINO, B.**, 2000. *Toxicología de alimentos* [en línea]. Mexico: s.n. ISBN 92 75 37004 4. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/toxicolo/toxico/toxico.pdf>.

**VELA-GARCÍA, N.GUAMÁN-BURNEO, M.C.y GONZÁLEZ-ROMERO, N.P.**, Efficient bioremediation from metallurgical effluents through the use of microalgae isolated from the amazonic and highlands of Ecuador. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 35, no. 4, 2019, pp. 917-929. ISSN 01884999. DOI 10.20937/RICA.2019.35.04.11.

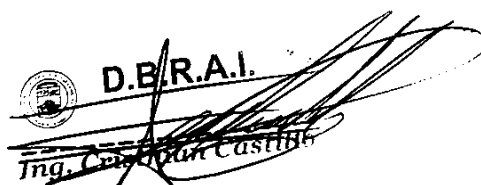
**VERA, L.UGUÑA, M.F.GARCÍA, N.FLORES, M.VÁZQUEZ, V.y ALOMA, I.**, Desarrollo de materiales sorbentes para la eliminación de metales pesados de las aguas residuales mineras. *Afinidad*, vol. 73(574), 2016.

**VILLALÓN, M.F.LAMELA, O.C.CARMENATY, D.A.C.y SILVA, R.M.P.**, Factores de mayor influencia en la adsorción de metales pesados por biomasa seca de *Kluyveromyces Marxianus* CCEBI 2011. *Tecnología Química*, vol. 38(2), 2018, pp. 394-411.

**WALTON, H.F. y REYES, J.**, 1983. *Análisis químico e instrumental moderno* [en línea]. Barcelona: Editorial Reverté. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/183506?page=253>.

**WEINER, E.R.**, 2012. *Applications of Environmental Aquatic Chemistry: A Practical Guide* [en línea]. (3rd. ed.). S.I.: Taylor & Francis Group. ISBN 9781439853337. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/140909>.

**ZUMBADO, H.**, 2002. *Introducción al análisis químico de los alimentos* [en línea]. Habana: s.n. ISBN 978-959-16-0253-4. Disponible en: [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/AnalisisdeAlimentos-Libro\\_22821.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/AnalisisdeAlimentos-Libro_22821.pdf).

  
D.B/R.A.I.  
Ing. Cristian Castillo





## ANEXOS

### ANEXO A. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA VARIACIÓN DEL PH EN UN TIEMPO DE 80MIN, 10 MG/L DE CD Y 0,1G DE OG

<b>pH</b>	<b>Ce</b>	<b>% Adsorción</b>
<b>4</b>	3,0758	69,242
<b>6</b>	3,0350	69,65
<b>8</b>	3,1096	68,904
<b>10</b>	2,8202	71,798
<b>12</b>	3,4365	65,635

**ANEXO B. DATOS OBTENIDOS DEL APARTADO CINÉTICA Y TIEMPO DE CONTACTO, A CONCENTRACIÓN INICIAL DE CADMIO DE 5MG/L Y 0,5 G DE OG**

Tiempo (min)	Temperatura 25°C		Temperatura 40°C		Temperatura 50°C	
	Concentración	%Adsor	Concentración	%Adsor	Concentración	%Adsor
1	3,9563	20,874	4,8619	2,762	4,8915	2,17
2	3,9513	20,974	4,3595	12,81	0,0978	98,044
3	3,4114	31,772	3,9915	20,17	4,2523	14,954
4	3,8981	22,038	4,0729	18,542	0,0992	98,016
5	3,7324	25,352	3,9783	20,434	4,8906	2,188
6	3,7183	25,634	3,8667	22,666	3,9066	21,868
7	3,9303	21,394	4,0366	19,268	4,0397	19,206
8	3,8166	23,668	4,1904	16,192	4,1788	16,424
9	3,239	35,22	3,1808	36,384	4,6062	7,876
10	3,6289	27,422	3,5589	28,822	4,3166	13,668
11	3,5639	28,722	3,9323	21,354	4,4552	10,896
12	3,5915	28,17	4,2901	14,198	4,7046	5,908
13	3,409	31,82	3,8985	22,03	4,7313	5,374
14	4,0295	19,41	3,8604	22,792	4,6684	6,632
15	3,4986	30,028	3,795	24,1	4,6732	6,536
16	3,4106	31,788	3,4538	30,924	4,6849	6,302
17	3,471	30,58	3,1015	37,97	4,2092	15,816
18	3,5989	28,022	3,5549	28,902	4,5763	8,474
19	3,5869	28,262	4,0606	18,788	4,1167	17,666
20	3,5673	28,654	3,5937	28,126	4,312	13,76
25	3,3714	32,572	3,7441	25,118	4,3126	13,748
30	3,6197	27,606	3,6241	27,518	4,3384	13,232
35	3,3423	33,154	3,2352	35,296	4,3138	13,724
40	3,6357	27,286	2,9126	41,748	4	20
45	3,6789	26,422	2,9721	40,558	3,4946	30,108
50	3,2481	35,038	2,8978	42,044	3,8847	22,306
60	3,8723	22,554	3,0002	39,996	3,3851	32,298
70	2,3819	52,362	2,9071	41,858	3,2814	34,372
80	3,3819	32,362	2,7052	45,896	2,4779	50,442