



CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE  
-CUNOR-

Ref. No.15-D-020-2022  
Cobán, A.V. 19 enero 2022

Doctor  
Hugo René Pérez Noriega  
Dirección General de Investigación  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente

Respetable Doctor Pérez:

Con un cordial saludo me dirijo a usted para hacer entrega en versión impresa y electrónica del informe final del proyecto de investigación titulado "Biosorción de metales pesados utilizando carbón activado obtenido de cáscara de cardamomo", "código DES3CU-2021"; coordinado por Inga. Karen Elizabeth Vásquez Villeda.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Lic. Zoot. Erwín Gonzalo Eskenasy Morales  
Director del CUNOR



c.c. archivo

---

7ma. Calle 1-11 zona 6, Cobán, Alta Verapaz, Código Postal 16001  
- PBX 7956-6600 - cunor@usac.edu.gt

# Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

Programa Universitario de Investigación en Ciencias Básicas

(nombre del programa universitario de investigación de la Digi)

Biosorción de metales pesados utilizando carbón activado obtenido de cáscara de cardamomo

nombre del proyecto de investigación

DES3CU-2021

código del proyecto de investigación

Centro Universitario del Norte, Instituto de Investigación y Tecnología de Ingeniería CUNOR, ITIC.

unidad académica o centro no adscrito a unidad académica avaladora

Karen Elizabeth Vásquez Villeda (coordinadora)  
Edgar Arnoldo Sierra Dubón (Auxiliar de investigación)

nombre del coordinador del proyecto y equipo de investigación contratado por Digi

Guatemala, Guatemala, 19 de enero del 2022

lugar y fecha de presentación del informe final 19/01/2022

**Contraportada**

# Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

## **Autoridades**

Dr. Hugo René Pérez Noriega  
Director General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar Pérez  
Coordinador General de Programas

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar Pérez  
Coordinador del Programa de Investigación en Ciencias Básicas

Lic. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales  
Director de Centro Universitario del Norte

## **Autores**

Karen Elizabeth Vásquez Villeda  
Coordinadora

Edgar Arnoldo Sierra Dubón  
Auxiliar de Investigación II

Colaborador: Marlon Daniel Coy Pop, CUNOR

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación (Digi), 2021. El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la Digi de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de del código DES3CU-2021 en el Programa Universitario de Investigación de Ciencias Básicas.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.



## Índice general

1	Resumen y palabras claves	7
2	Introducción	8
3	Planteamiento del problema	9
4	Delimitación en tiempo y espacio	10
4.1	Delimitación en tiempo	10
4.2	Delimitación espacial	10
5	Marco teórico	10
6	Estado del arte	17
7	Objetivos	17
7.1	General	17
7.2	Objetivos específicos	17
8	Hipótesis	18
9	Materiales y métodos	18
9.1	Enfoque de la investigación	18
9.2	Método	18
9.3	Recolección de información	24
9.4	Técnicas e instrumentos	28
9.5	Procesamiento y análisis de la información	30
10	Resultados y discusión	43
10.1	Resultados	43
10.2	Discusión de resultados:	44
11	Referencias	45
12	Apéndice	52
13	Aspectos éticos y legales (si aplica)	55
14	Vinculación	55

# Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

15	Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual	55
16	Aporte de la propuesta de investigación a los ODS:	55
17	Orden de pago final	55
18	Declaración del coordinador(a) del proyecto de investigación	55
19	Aval del director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario	¡Error! Marcador no definido.
20	Visado de la Dirección General de Investigación	¡Error! Marcador no definido.

## Índice de tablas

Tabla 1:	Contaminantes inorgánicos en aguas residuales industriales por actividad	9
Tabla 2:	Factores y niveles que se utilizarán en investigación	19
Tabla 3:	Arreglo matricial diseño ortogonal 34-2III	19
Tabla 4:	Factores considerados como ruido en los análisis de los 3 metales	21
Tabla 5:	Recolección de información para el metal cadmio Cd+2	22
Tabla 6:	Recolección de información para el metal cadmio Cu+2	22
Tabla 7:	Recolección de información para el metal cadmio Zn+2	23
Tabla 8:	Concentraciones finales de Cd+2 en solución	23
Tabla 9:	Concentraciones finales de Cu+2 en solución	24
Tabla 10:	Concentraciones finales de Zn+2 en solución	24
Tabla 11:	Técnicas e instrumentos	25
Tabla 12:	Operacionalización de las variables o unidades de análisis	26
Tabla 13:	Valores de los análisis de varianza y desviación estándar para Cd+2	29
Tabla 14:	Resultados experimentales y relación S/R para biosorción del metal Cd+2	30
Tabla 15:	Respuestas para relaciones señal/ruido, más grande es mejor para Cd+2	30
Tabla 16:	Valores de los análisis de varianza y desviación estándar para Cu+2	32
Tabla 17:	Resultados experimentales y relación S/R para biosorción del metal Cu+2	33
Tabla 18:	Respuestas para relaciones señal/ruido, más grande es mejor para Cu+2	33
Tabla 19:	Valores de los análisis de varianza y desviación estándar para Zn+2	35
Tabla 20:	Resultados experimentales y relación S/R para biosorción del metal Zn+2	36
Tabla 21:	Respuestas para relaciones señal/ruido, más grande es mejor para Zn+2	36
Tabla 22:	Parámetros de modelos cinéticos de pseudo primer y segundo orden	37
Tabla 23:	Valores de capacidad de adsorción del carbón activado para el metal Cd+2	37
Tabla 24:	Valores de capacidad de adsorción del carbón activado para el metal Cu+2	38
Tabla 25:	Valores de capacidad de adsorción del carbón activado para el metal Zn+2	38

Tabla 26: Resultados de los niveles ideales para mayor biosorción de los metales en solución acuosa	41
Tabla 27: Resultados de porcentaje de adsorción de los iones metálicos en solución acuosa	41

## Índice de figuras

Figura 1: Impacto de los diferentes grupos de contaminantes en la salud humana y calidad del agua	10
Figura 2: Tamaños y designación de tamices ASTM	12
Figura 3: Isotermas de Adsorción	13
Figura 4: Tipos de adsorción	14
Figura 5: Isoterma lineal para determinación de volumen total de poros.	17
Figura 6: Estimación de área superficial del carbón activado	18
Figura 7: Proceso de biosorción de metales en solución acuosa	18
Figura 8: Curvas de análisis de metales en solución acuosa	25
Figura 9: Comportamiento de los niveles y factores en adsorción del metal Cd+2 para las medias	28
Figura 10: Comportamiento de los niveles en cada factor para relación señal/ruido en metal Cd+2	28
Figura 11: Análisis de efectos principales de desviación estándar para Cd+2	29
Figura 12: Comportamiento de los factores en los distintos niveles para Cu+2 en las medias	31
Figura 13: Comportamiento de los factores en cada nivel para señal/ruido en Cu+2	31
Figura 14: Análisis de efectos principales para desviación estándar del Cu+2	32
Figura 15: Comportamiento de los factores en los distintos niveles para Zn+2 en las medias	34
Figura 16: Comportamiento de los factores en cada nivel para señal/ruido en Zn+2	34
Figura 17: Análisis de efectos principales para desviación estándar del Zn+2	35
Figura 18: Gráficas de modelo cinético para ión metálico Zn+2	39
Figura 19: Gráficas de modelo cinético para ión metálico Cu+2	39
Figura 20: Gráficas de modelo cinético para ión metálico Cd+2	40
Figura 21: Proceso de preparación de carbón activado	49
Figura 22: Proceso de contacto de solución acuosa y metal	50
Figura 23: Análisis de cantidad de metal en solución acuosa	51

## 1 Resumen y palabras claves

En la actualidad existen ríos contaminados por el incremento del uso de pesticidas, agroquímicos, fungicidas, otros; y es necesario buscar alternativas para mitigar este tipo de contaminación. La presente investigación consistió en utilizar carbón activado procedente de cáscara de cardamomo para eliminar metales pesados en soluciones acuosas. Los metales pesados analizados fueron  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$  y  $\text{Zn}^{+2}$ , se realizó un diseño experimental de Taguchi con arreglo ortogonal L9 con 3 réplicas. Los parámetros seleccionados para este estudio fueron: tiempo de contacto, pH, concentración inicial del metal y granulometría con 3 niveles cada una. El objetivo de la investigación fue determinar cuáles eran las interacciones óptimas entre cada factor controlable para obtener la mayor cantidad del ión metálico adsorbido. Los resultados experimentales se analizaron por medio de un análisis de varianza y relación señal/ruido. Para el análisis de metales en solución acuosa se utilizó el equipo Metalyser Benchtop HM5000. Se concluyó que la capacidad de adsorción fue mayor al 99% para cada ión metálico en solución acuosa y la combinación óptima recomendada por predicción de Taguchi fue:  $\text{Cd}^{+2}$  80 min, pH=5, 14.57 ppm y 0.297 mm., para  $\text{Cu}^{+2}$  120 min, pH=2, 10.52 ppm y 0.297 mm., para  $\text{Zn}^{+2}$  80 min, pH=2, 57.564 ppm y 0.177 mm. Los valores de adsorción fueron:  $\text{Cd}^{+2}$  21.8 mg/g,  $\text{Cu}^{+2}$  15.6 mg/g y  $\text{Zn}^{+2}$  28.60 mg/g. También se identificó que el modelo cinético de adsorción que más se adaptó fue el de pseudo segundo orden y la isoterma de adsorción utilizada fue de Langmuir.

**Palabras claves:** adsorción, acuoso, carbón, isoterma.

### Abstract and keyword

At present there are rivers contaminated by the increase in the use of pesticides, agrochemicals, fungicides, others; and it is necessary to look for alternatives to mitigate this type of contamination. The present investigation consisted of using activated carbon from cardamom shell to remove heavy metals in aqueous solutions. The heavy metals analyzed were  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$  and  $\text{Zn}^{+2}$ , a Taguchi experimental design was carried out with L9 orthogonal arrangement with 3 replicas. The parameters selected for this study were: contact time, pH, initial metal concentration and granulometry with 3 levels each. The objective of the research was to determine which were the optimal interactions between each controllable factor to obtain the greatest amount of the adsorbed metal ion. The experimental results were analyzed by means of an analysis of variance and signal / noise ratio. For the analysis of metals in aqueous solution, the Metalyser Benchtop HM5000 equipment was used. It concluded that the adsorption capacity was greater than 99% for each metal ion in aqueous solution and the optimal combination recommended by Taguchi's prediction was:  $\text{Cd}^{+2}$  80 min, pH = 5, 14.57 ppm and 0.297 mm ., for  $\text{Cu}^{+2}$  120 min, pH = 2, 10.52 ppm and 0.297 mm., for  $\text{Zn}^{+2}$  80 min, pH = 2, 57.564 ppm and 0.177 mm. The adsorption values were:  $\text{Cd}^{+2}$  21.8 mg / g,  $\text{Cu}^{+2}$  15.6 mg / g and  $\text{Zn}^{+2}$  28.60 mg / g. It was also identified that the adsorption kinetic model that was best adapted was the pseudo-second order model and the adsorption isotherm used was Langmuir's.

**Keywords:** adsorption, aqueous, carbon, isotherms.

## 2 Introducción

La contaminación de aguas superficiales se puede ver afectada por la fabricación de productos químicos para aumentar rendimientos en procesos, cultivos, medicamentos, entre otros. “Existe una colección electrónica de miles de sustancias químicas que están reguladas en mercados clave de todo el mundo. CHEMLIST contiene más de 394,000 sustancias” (CHEMLIST, 2020). Elías (2015) indica que “Guatemala pasó de tener 7,5 millones de habitantes en 1976, a 15,8 millones en 2015. El caudal de aguas negras, las que son vertidas sin ningún tratamiento a los ríos que rodean ciudades y poblaciones, se ha triplicado en ese tiempo”; incrementando contaminación en ríos. “A las aguas negras se suman los metales pesados que desecha la industria, y los herbicidas y plaguicidas de las grandes plantaciones, que producen alimentos cuyas exportaciones sostienen uno de los pilares fundamentales de la economía nacional” (Elías, 2015). El Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación en el 2021 promovió que “es importante hacer un llamado para el uso correcto y responsable de los agroquímicos a fin de preservar el ambiente y proteger la salud de los usuarios y consumidores” (p. 1).

Nicolás-Méndez, Ortiz-Muñiz, Mendoza-Núñez, & García-Rodríguez (2020) especifican que: “Los metales pesados han recibido especial atención debido a la exposición creciente de las poblaciones a los mismos por sus usos industriales. Metales como As, Cd, Cu y Fe se han asociado a procesos inflamatorios y, particularmente, a la inducción de cáncer” (p. 375).

Burciaga-Montemayor, Claudio-Rizo, Cano-Salazar, Martínez-Luévanos, & Vega-Sánchez (2020) indicaron que:

En las últimas décadas, los científicos a nivel global han desarrollado diversas técnicas para el tratamiento de efluentes contaminados, sin embargo, aún existen varios problemas que no se han logrado eliminar o reducir. En este contexto, existen algunos contaminantes que por su naturaleza persistente, son difíciles de remover, estos son los iones de metales pesados (p. 2).

En este contexto se utilizó la cáscara de cardamomo que ha sido modificada químicamente a carbón activado como biosorbente, se utilizó un sistema batch que a través de agitación constante se realizó la biosorción del metal pesado en solución. Las variables que se modificaron durante el proceso fueron pH, tiempo de contacto, concentración de metales y granulometría; de tal forma se establecieron los parámetros óptimos para una mejor adsorción de los metales. En otros estudios se a transformado cáscara de coco, cáscara de arroz, cáscara de cacao, cáscara de naranja en carbón activado para para aplicaciones en descontaminación de aguas.

El aporte del estudio radicará en conocer la capacidad de biosorción que posee el carbón activado obtenido de cáscara de cardamomo y así tener una opción más en tecnologías de carbón activado para mitigar contaminantes metálicos disueltos en agua.

“Algunos biomateriales han sido ampliamente probados como adsorbentes y demostrado que pueden eliminar efectivamente metales pesados de las aguas residuales, tales como residuos de hojas de té, pepino, yuca, papa, nanjea” (Tejada-Tovar, Villabona-Ortíz, & Osorio-García, 2020, p. 25).

Se utilizó diseño experimental que consistió en modelo factorial fraccionado  $3^{4-2}_{III}$  en el cual se manejan 4 factores con 3 niveles cada uno. El análisis estadístico seleccionado fue señal/ruido, en la relación señal/ruido se escogerá el valor nominal es el mejor.

### 3 Planteamiento del problema

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2016) especifica que “Guatemala cuenta con 3 vertientes hidrográficas, del Golfo de México, del Atlántico y del Pacífico, 38 cuencas y 194 cuerpos de agua”. Es importante reconocer que los ríos de Guatemala se encuentran contaminados por metales pesados. En el año 2020 Guatemala tiene 11 de los 25 ríos más contaminantes de Centroamérica (Sapalú, 2020).

En el año 2020 los autores Spillman y colaboradores indicaron que en Guatemala “en áreas agrícolas, los pesticidas representan la primera fuente de contaminación en aguas superficiales”(p.18).

Castillo (2019) indica que:

Los ríos Selegua, La Viña y San Lorenzo, que alguna vez fueron cristalinos, se han convertido en corrientes de aguas negras, y debido a los altos niveles de metales pesados y productos químicos que se derraman en ellos, la vida ecológica ha muerto.

La contaminación por metales pesados puede provenir de actividad antropogénica, plaguicidas, agroquímicos, fungicidas, entre otros. Actualmente se está enfrentando una situación en donde la humanidad está usando grandes cantidades de desinfectantes los cuales poseen muchos elementos químicos entre ellos metales pesados porque “la acción antibacteriana del mercurio y otros metales pesados se basa en su capacidad para reaccionar con los grupos sulfhidrilos de las proteínas para formar sulfuros, anulando de esta forma la actividad enzimática” (González, 2003, p. 66); razón por la cual aumentará la cantidad de dichos elementos en las aguas de ríos.

Es transcendental tener tecnologías que permitan reducir la contaminación en ríos por metales pesados; y con ello evitar daños en la salud y ambiente, por ello se estudiará la capacidad de adsorción de metales pesados ( $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ) utilizando carbón activado obtenido de la modificación química de cáscara de cardamomo.

## 4 Delimitación en tiempo y espacio

### 4.1 Delimitación en tiempo

La investigación dio inicio a partir del mes de febrero de 2021 y culminó en el mes de diciembre de 2021.

### 4.2 Delimitación espacial

El carbón activado que se utilizó se obtuvo de la cáscara de cardamomo recolectada en beneficios de cardamomo ubicados en el casco urbano de Cobán, Alta Verapaz; la cual sufrió modificación química en el Instituto de Investigación y Tecnología de Ingeniería CUNOR; así mismo todas las soluciones metálicas se prepararon en dicho laboratorio.

## 5 Marco teórico

**Metales pesados:** “estas sustancias tóxicas tienden a persistir indefinidamente en el medio ambiente” (Tejada-Tovar, Villabona-Ortíz, & Garcés-Jaraba, 2015, p.111).

Según Fernández (2019) describe:

Dentro de los metales pesados, considerando su naturaleza, se distinguen dos grupos. Por un lado, se encuentra el grupo de los oligoelementos o micronutrientes, que son los que necesitan las plantas y animales en cantidades muy pequeñas o cantidades traza, para que completen su ciclo vital. Sin embargo, superando el nivel umbral establecido se vuelven tóxicos (B, Ni, Mn). Por otro lado, está el grupo de los metales pesados sin función biológica determinada, que lleva aparejadas disfunciones en el funcionamiento de los organismos, son, por tanto, altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos (p. 30).

En Tabla 1 se “se presentan los contaminantes más importantes presentes en las aguas residuales industriales, indicando para cada uno de ellos, las principales industrias que lo generan”. (Fernández, 2019).

**Tabla 1**

*Contaminantes inorgánicos en aguas residuales industriales por actividad*

Industria	Contaminante
-----------	--------------

Metal y minerales metálicos	Arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, zinc y sus compuestos. Cianuros y fluoruros. Compuestos orgánicos de estaño
Productos químicos inorgánicos y fertilizantes	Arsénico, cobre, plomo, mercurio, níquel, zinc y sus compuestos. Cloruros y fluoruros. Fósforo
Cemento y materiales cerámicos	Arsénico
Productos químicos orgánicos	Cloruros, cianuros y fluoruros, cobre plomo, mercurio, níquel, zinc y sus compuestos. Fósforo
Instalaciones de combustión	Cloruros, cobre y sus compuestos
Refinerías de petróleo y gas	Plomo y sus compuestos
Madera y papel	Fósforo. Zinc y sus compuestos
Lácteas, mataderos y otras	Fósforo

*Nota.* Adaptado de “Eliminación de metales pesados mediante biosorción: Desarrollo de procesos de tratamientos para aguas residuales industriales”, por Fernández R, 2019, p. 20.

En Figura 1 se encuentra “el resumen de sustancias consideradas en cada grupo y sus principales impactos en la salud humana y la calidad del medio ambiente del agua” (European Environment Agency, 2018).

**Figura 1**

*Impacto de los diferentes grupos de contaminantes en la salud humana y calidad del agua*

<i>Grupo de contaminantes</i>	<i>Sustancias inorgánicas</i>	<i>Sustancias orgánicas cloradas</i>	<i>Otras sustancias orgánicas</i>	<i>Metales pesados</i>
<b>Sustancias consideradas en este reporte</b>	Cloruros Cianuros Fluoruros	Difenil eter bromados Cloro alcanos Diclorometano	Antraceno Benceno Etilbenceno	Arsénico Cadmio Cromo

# Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

	Nutrientes (nitrógeno y fósforo)	Dioxinas y furanos Compuestos orgánicos halogenados Hexabromobifenil Hexaclorobenceno Hexaclorobutadieno Tetracloroetileno Tetraclorometano Bifenil policlorado Pentaclorobenceno Pentaclorofenol Cloruro de vinilo 1,2-dicloroetano	Óxido de etileno Fluoranteno Naftaleno Nonilfenol Octilfenol Compuestos orgánicos Fenol Hidrocarburos policíclicos aromáticos Tolueno Xileno	Cobre Mercurio Níquel Zinc
<b>Impacto asociado a la salud en humanos</b>	Los cloruros generalmente no son tóxicos para los humanos, excepto en casos especiales de alteración de cloruro de sodio donde el metabolismo provoca problemas en el corazón. Altos contenidos de nitratos pueden ocasionar metahemoglobinemia en niños.	Algunas de estas sustancias son conocidas por ser cancerígenas, pueden impactar en los órganos humanos.	Este es un rango muy amplio de compuestos y los impactos en la salud es variada. Algunos son cancerígenos. Algunos de estos compuestos pueden estar envueltos en las reacciones atmosféricas que generen niveles de ozono y	Los metales pesados tienen un rango potencial de impactos en la humanidad. Algunos de ellos son cancerígenos. Algunos incluyen daño en riñones e hígado, también impacto en el desarrollo del cerebro de los niños.

# Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

			contaminar el aire.	
<b>Impacto en el medio acuático</b>	El impacto de cloruros en agua es en organismos y plantas, alterando sus tasas de reproducción, incremento en la mortalidad de especies y cambio en las características locales del ecosistema. Grandes cantidades de nitrato ocasionan eutrofización, crecimiento de planta, problemas de algas, desbalance de organismos presentes en el agua.	Algunas de estas sustancias se conocen por impactar en el crecimiento y reproducción de animales acuáticos. Algunos de estos compuestos se pueden acumular en los animales acuáticos, presentando problemas de cambio de comida.	Entre los impactos de salud en las personas, en el ambiente acuático la cantidad de contaminantes es variado. Por ejemplo, algunos compuestos orgánicos son muy tóxicos para algas, moluscos, crustáceos y peces, y se han identificado descriptores endocrinos. Algunos de estos compuestos se acumulan en animales marítimos, resultando un impacto a lo largo de la cadena alimentaria.	Los metales pesados son la mayor preocupación para el ambiente acuático debido a su toxicidad y persistencia. Algunos de estos metales son definidos como sustancias de prioridad bajo la WFD.

*Nota.* Adaptado de “Industrial waste wáter treatment pressures on Europe’s environment”, European Environment Agency (2018).

**Adsorción:** “es un fenómeno de superficie que involucra la transferencia de masa del adsorbato (gas o líquido) a la superficie de un sólido (adsorbente)” (Obregón, 2012, p. 18).

“Para moléculas altamente volátiles la cantidad adsorbida aumenta con la disminución del tamaño de poro mientras que para moléculas con altos puntos de ebullición la cantidad adsorbida aumenta con el desarrollo de la porosidad y el área específica” (Silvestre, Silvestre, Sepulveda, Rodríguez & Reinoso, 2009, p. 62).

**pH:** “es la concentración de iones  $[H^+]$  o de iones  $[H_3O^+]$  a través de la siguiente fórmula logarítmica:  $pH = -\log_{10}[H^+] = -\log_{10}[H_3O^+]$ ” (Albarado-Tabachi, 2018, p.47).

Los valores de pH se encuentran entre 0 y 14; por razones de convención son los siguientes:

- ✓  $pH < 7$  ----- soluciones ácidas
- ✓  $pH = 7$  ----- soluciones neutras
- ✓  $pH > 7$  ----- soluciones básicas

Existe también otro tipo de clasificación para los líquidos según acidez, alcalinidad o neutralidad:

- ✓ Soluciones ácidas-----  $[H^+] > [OH^-]$
- ✓ Soluciones neutras -----  $[H^+] = [OH^-]$
- ✓ Soluciones básicas -----  $[H^+] < [OH^-]$

**Concentración de soluciones:** existen diferentes formas de expresar concentraciones de soluciones, entre ellas se encuentra: molaridad, normalidad, ppm. En la expresión de partes por millón “se utiliza para medir los elementos en cantidades muy pequeñas presentes en una mezcla” (Timberlake, 2013, p. 312).

La fórmula para determinar concentraciones en partes por millón es la siguiente:

$$ppm = \frac{mg \text{ de soluto}}{Litros \text{ de solución}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

**Granulometría:** es la distribución del tamaño de un grano, ya sea arenas, gravas, carbón activado, antracita, zeolita y una amplia gama de otros medios granulares.

Palacio, Chávez & Velásquez (2016) indicaron “tamaños y designación de tamices ASTM”(p.99).

## Figura 2

## Tamaños y designación de tamices ASTM

Posición	Abertura (pulg.)	Abertura (mm)	Designación tamiz	Módulo de finura
0	3/1024	0,0744 ~ 0,075	# 200	0
1	3/512	0,149 ~ 0,150	# 100	1
2	3/256	0,298 ~ 0,300	# 50	2
3	3/128	0,595 ~ 0,600	# 30	3
4	3/64	0,196 ~ 1,20	# 16	4
5	3/32	2,381 ~ 2,40	# 8	5
6	3/16	4,762 ~ 4,80	# 4	6
7	3/8	9,52 ~ 9,5	3/8"	7
8	¾	19,05 ~ 19	3/4"	8
9	3/2	38,1 ~ 38	1.5"	9
10	3	76,2 ~ 76	3"	10

*Nota:* los valores de abertura (mm) son valores de acuerdo a ASTM.

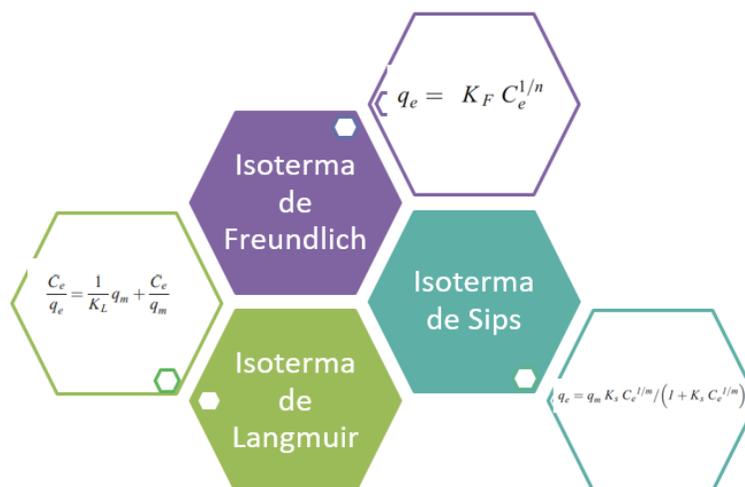
**Isotermas de adsorción:** “relacionan la cantidad removida de iones y la que permanece en disolución cuando se alcanza el equilibrio a una temperatura constante” (Castellar & García, 2011).

“Las isotermas de adsorción son vitales para visualizar la naturaleza de las interacciones de adsorbato con un adsorbente” (Ihsanullah, Sajid, Kabeer, Shemsi, & Atieh, 2020).

Las isotermas más utilizadas se muestran en Figura 3.

**Figura 3**

*Isotermas de Adsorción*



*Nota:* la isoterma de Sips relaciona la isoterma de Langmuir y Freundlich.

**Capacidad de adsorción:** se logra definir en base a isotermas de adsorción en disolución, dichas isotermas reflejan la relación de dependencia a una temperatura constante de la cantidad de adsorbato adsorbido por peso unitario de adsorbente con respecto a concentración de adsorbato en equilibrio.

El equilibrio químico de un adsorbato por un adsorbente se describe a continuación:



Lima, Hosseini-Bandegharai, Moreno-Piraján, & Anastopoulos (2018) indican que el potencial químico para este sistema de equilibrio podría considerarse como:

Ecuación (3)

$$\mu^{\circ} \text{adsorbente} - \text{adsorbato} = \mu^{\circ} \text{adsorbente} - \text{adsorbato} + RT \ln \frac{[\text{Adsorbente} - \text{Adsorbato}(s)]}{[\text{Adsorbente} - \text{Adsorbato}(s)]^{\circ}}$$

“El  $[\text{adsorbato}]^{\circ}$ ,  $[\text{adsorbente}_{(s)}]^{\circ}$  y  $[\text{adsorbato-adsorbente}_{(s)}]^{\circ}$  son las concentraciones estándar de adsorbato, adsorbente y adsorbato-adsorbente, respectivamente, cuyas concentraciones por definiciones es 1 mol/L en condiciones estándares”(Lima et al., 2018).

Los tipos de adsorción según el tipo de interacción soluto-adsorbente viene dado de la siguiente manera:

## Figura 4

*Tipos de adsorción*



*Nota:* Adaptado de “Adsorción” por Huerta, S. 2019, p. 5.

## 6 Estado del arte

En los últimos años se han realizado investigaciones para eliminar o disminuir la contaminación por metales pesados, entre ellas se encuentra “Compósitos en estado hidrogel con aplicación en la adsorción de metales pesados presentes en aguas residuales” (Burciaga-Montemayor, Claudio-Rizo, Cano-Salazar, Martínez-Luévanos, & Vega-Sánchez, 2020, p. 1-13) la cual consiste en la generación de matrices poliméricas en estado hidrogel reforzadas con materiales inorgánicos o mezclas de redes poliméricas generando compósitos, para mejorar o incrementar la capacidad de adsorción. También se realizó la investigación “Remoción de mercurio (II) en solución acuosa usando residuo industrial de yuca (*Manihot esculenta*)” (Albis, Arzuza, & Mosquera, 2019, p. 33-39) la cual definió un modelo de cinética de adsorción de primer orden y se adaptó el modelo de adsorción de Langmuir. Otro estudio importante es “Adsorption kinetics, isotherm and reusability studies for the removal of cationic dye from aqueous médium using arginine modified activated carbon” (Naushad et al., 2019, p. 1-8).

## 7 Objetivos

### 7.1 General

Determinar la capacidad de biosorción de metales pesados ( $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ) en medios acuosos utilizando carbón activado obtenido de cáscara de cardamomo.

### 7.2 Objetivos específicos

1. Determinar el comportamiento de biosorción de metales pesados al modificar valores de pH.
2. Establecer tiempo óptimo de contacto para biosorción de metales pesados.
3. Definir comportamiento de biosorción modificando concentraciones de metales pesados.
4. Establecer tamaño de granulometría ideal para biosorción de metales pesados.

## 8 Hipótesis:

Hi: existe relación entre las variables para mayor adsorción de los metales pesados en solución acuosa.

Ho: No existe relación entre las variables para mayor adsorción de los metales pesados en solución acuosa.

## 9 Materiales y métodos

### 9.1 Enfoque de la investigación

Es cuantitativo. El tipo de investigación es experimental porque se controlaron las variables independientes

### 9.2 Método

**Preparación de solución del metal:** las soluciones acuosas de los metales se obtuvieron disolviendo por separado cloruro de cinc ( $ZnCl_2$ ), cloruro de cobre dihidratado y nitrato de cadmio. Las 3 concentraciones que se utilizaron fueron: 40 ppm, 80 ppm y 120 ppm. Los valores de la mezcla se pueden observar en Tabla 2, los reactivos se adquirieron en casa Merck Guatemala.

**Estudios de adsorción:** para estudiar la adsorción de iones de  $Cu^{+2}$ ,  $Cd^{+2}$  y  $Zn^{+2}$  en carbón activado obtenido de cáscara de cardamomo, se utilizó el siguiente método:

- ✓ Método de voltamperometría de desprendimiento anódico. Equipo Metalyser Benchtop HM5000. Método para zinc T2O AN505 SMWW 3130 B, método para cobre T2O AN504 adaptado SMWW 3130 A, método para cadmio T2O AN501 SMWW 3130 B.

Después de estar en contacto el carbón activado con las soluciones, se realizaron los ensayos con los métodos indicados y se determinó la cantidad final del metal presente en solución acuosa. La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$Ca = (Co - Cf) \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

Ca = Cantidad adsorbida del metal (ppm)

Co = concentración inicial del metal en solución (ppm)

Cf = concentración final del metal en solución (ppm)

Isoterma de Langmuir “uno de los modelos más utilizados para describir el equilibrio de biosorción” (Fernández-González, Martín-Lara, Blázquez, Pérez, & Calero, 2019).

$$q_e = \frac{(bq_m C_e)}{(1+bC_e)} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

qe = capacidad de adsorción (mg/g)

qm = capacidad máxima de adsorción (mg/g)

b = constante de Langmuir, relaciona la afinidad de los sitios de unión con la energía de adsorción (L/mg).

Ce = concentración del metal en el equilibrio (mg/L)

Capacidad de adsorción de los metales en soluciones acuosas, utilizando la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{(C_i - C_e)}{m} * V \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

qe = capacidad de adsorción (mg/g)

Ci = concentración del metal inicial (mg/L)

Ce = concentración del metal en equilibrio (mg/L)

m = masa de adsorbente usado (g)

V = volumen de la disolución (L)

## Método de Brunauer, Emmett y Teller (BET)

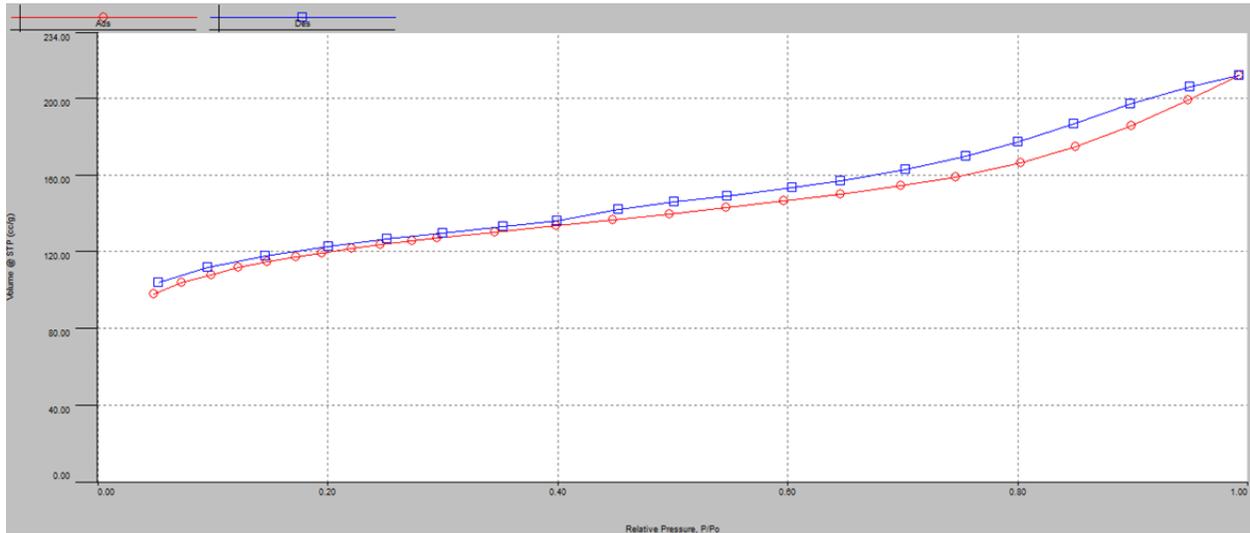
Para la determinación de capacidad de adsorción del carbón activado, en el año 2020 se determinó que el carbón activado obtenido de cáscara de cardamomo “tuvo un área superficial de 440.7 m<sup>2</sup>/g y volumen total de poros de 0.33 cm<sup>3</sup>/g” (Vásquez, Herrera & Sierra, 2020, p.2), utilizando la isoterma de adsorción de nitrógeno con el método BET. Ver figura 5 y 6.

Ecuación para isoterma de adsorción tipo I para materiales microporosos obtenida de figura 5:

$$y = 98.249x + 97.359$$

**Figura 5**

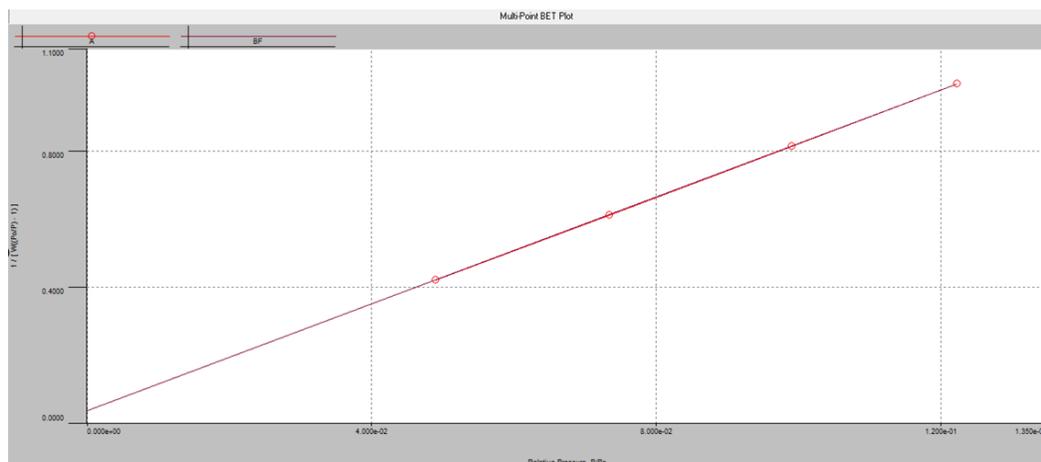
*Isoterma lineal para determinación de volumen total de poros.*



*Nota.* La línea roja es de adsorción y línea azul es desorción. Gráfica se obtuvo de software del equipo Nova4200e, marca Quantachrome (Vásquez, Herrera & Sierra, 2020, p.17)

**Figura 6**

*Estimación de área superficial del carbón activado*

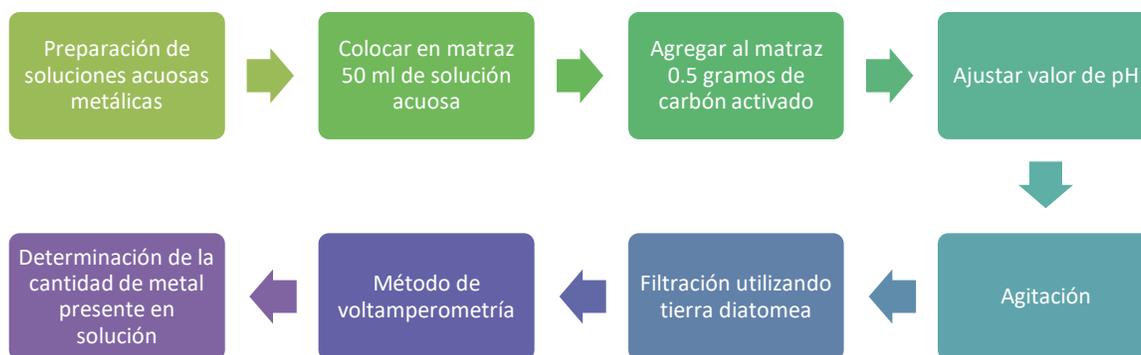


*Nota.* Línea roja es adsorción y línea púrpura es desgasificación de superficie. Gráfica se obtuvo de software del equipo Nova4200e, marca Quantachrome (Vásquez, Herrera & Sierra, 2020, p.18)

**Experimento de adsorción:** se tomó en un matraz 50 ml de solución acuosa que contenía el metal y se agregó 0.5 gramos de carbón activado obtenido de cáscara de cardamomo, se midió pH y se ajustó de acuerdo al valor deseado, se procedió a realizar agitación, se procedió a realizar filtración utilizando tierra diatomea para evitar el paso del carbón activado; finalmente la solución filtrada se analizó por método de voltamperometría. Las variables que se controlaron fueron: tiempo de agitación, pH, concentración inicial del metal y tamaño de partícula.

**Figura 7**

*Proceso de biosorción de metales en solución acuosa*



**Para investigación cuantitativa:** se utilizó un diseño experimental ortogonal de Taguchi, en el cual se utilizaron 4 factores con 3 niveles cada uno. De acuerdo al modelo  $3^{4-2} = 3^2 =$

9 corridas experimentales con 3 réplicas. “A este diseño, Taguchi lo llamó diseño de arreglo interior” (Nájera, 2007). Los tres niveles de los factores se van a indicar como nivel inferior (1), nivel intermedio (2) y nivel superior (3). Como la cantidad de corridas fueron 9, existen 8 grados de libertad entre ellas.

**Tabla 2**

*Factores y niveles que se utilizarán en investigación*

	FACTORES			
	Tiempo de agitación (min)	Concentración de metal (ppm)	pH	Granulometría (mm)
<b>Niveles</b>	30	40	2	0.297
	80	80	5	0.177
	120	120	8	0.074

*Nota:* variables que serán controladas durante proceso.

**Tabla 3**

*Arreglo matricial diseño ortogonal  $3^{4-2}_{III}$*

Corrida	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

*Nota:* A= tiempo de agitación, B= concentración, C = pH, D= granulometría, 1= valor inferior, 2= valor intermedio, 3= valor superior

- Los factores a estudiar se eligieron por ser de gran interés en proceso.
- Los valores de niveles se eligieron de acuerdo a estudios realizados con otro tipo de cáscaras modificadas químicamente.

**Selección del método de análisis estadístico:** uno de los objetivos de la investigación fue determinar los parámetros ideales para una mejor bioadsorción de metales en solución acuosa, de tal forma se verificó si los factores realmente alteraron los resultados al fijarlos

en los distintos niveles. Se utilizó el análisis estadístico Señal/Ruido con la característica de calidad del mejor valor nominal. Entre los valores ruidos identificados estuvieron, temperatura de agitación y revoluciones por minuto en procedimiento de agitación.

“Se establece la relación señal-ruido (S/N) con la finalidad de encapsular el ruido (variables) interno y externo que pueda afectar al proceso” (Ríos, Aburto, & Ortega, 2020).

En la relación señal/ruido se escogió el valor nominal es el mejor; porque los factores que afectan el promedio (Tipo II) se utilizan para ajustar el proceso hacia el valor objetivo (mejor valor nominal).

### Procedimiento para la reducción de la variabilidad del proceso:

Para determinar el promedio  $P_i$  de los valores de las réplicas se utilizó la siguiente ecuación:

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Para el cálculo de la suma de cuadrados de promedio  $Sm$  se utilizará:

$$Sm = nP_i^2 \quad \text{Ecuación (5)}$$

Para calcular varianza experimental  $V_e$  se utilizará:

$$v_e = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^2) - Sm}{n-1} = \frac{(y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2) - Sm}{n-1} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Para el cálculo de la relación S/R se utilizará la siguiente ecuación:

$$S/R = 10 \log \left[ \left( \frac{1}{n} \right) \left( \frac{Sm - v_e}{v_e} \right) \right] \quad \text{Ecuación (7)}$$

Luego de realizar los cálculos mencionados anteriormente; se procederá a realizar lo siguiente:

- ✓ Se calculó el promedio de los valores S/R de los factores en cada nivel
- ✓ Se construyeron gráficas del promedio de los valores S/R, basándose en las respuestas promedio S/R de los factores.
- ✓ Se analizaron las tablas de respuestas promedio S/R y gráficas de respuesta S/R, con lo cual se determinaron los factores que eran más significativos para reducir la variación.

- ✓ De acuerdo a los resultados que se obtuvieron después de realizar análisis S/R, se eligieron los factores con las mayores respuestas promedios S/R

Para realizar el análisis estadístico, se utilizó el programa Minitab 17 con licencia para estudiantes.

**Tabla 4**

*Factores considerados como ruido en los análisis de los 3 metales*

Corrida	Temperatura de agitación (°C)	Agitación (RPM)
1	20	40
2	20	45
3	20	50
4	22	40
5	22	45
6	22	50
7	25	40
8	25	45
9	25	50

*Nota.* La temperatura de agitación dependió de la temperatura ambiente.

### 9.3 Recolección de información

Se obtuvieron muestras de carbón activado derivado de cáscara de cardamomo en Instituto de Investigación y Tecnología de Ingeniería CUNOR, utilizando los parámetros recomendados en investigación realizada en 2020. La cáscara se obtuvo de los beneficios de cardamomo ubicados en el casco urbano de Cobán, Alta Verapaz. Criterios de inclusión: cáscara de cardamomo modificada químicamente a carbón activado. Criterios de exclusión: la cáscara de cardamomo no tenía que ser fresca. Los elementos necesarios fueron carbón activado, solución acuosa de metales pesados, tiempo de agitación, pH, granulometría y equipo voltamperométrico. Los análisis se

# Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

realizaron en Instituto de Investigación y Tecnología de Ingeniería CUNOR y Laboratorio Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ISALAB).

**Tabla 5**

*Recolección de información para el metal cadmio Cd+2*

Corrida	Tiempo (min)	pH	Concentración inicial de Cadmio (ppm)	Granulometría (mm)	Réplica 1 Concentración adsorbida (ppm)	Réplica 2 Concentración adsorbida (ppm)	Réplica 3 Concentración adsorbida (ppm)	Promedio de Adsorción (ppm)
1	30	2	14.570	0.297	14.425	14.428	14.422	14.425
2	30	5	29.152	0.177	29.141	29.139	29.142	29.141
3	30	8	43.728	0.074	43.099	43.101	43.098	43.099
4	80	2	14.570	0.074	14.561	14.560	14.562	14.561
5	80	5	29.152	0.297	29.142	29.140	29.143	29.142
6	80	8	43.728	0.177	43.433	43.436	43.431	43.433
7	120	2	14.570	0.177	14.031	14.032	14.030	14.031
8	120	5	29.152	0.074	29.136	29.134	29.137	29.136
9	120	8	43.728	0.297	42.906	42.908	42.903	42.906

*Nota.* Los valores adsorbidos se determinaron de acuerdo a la ecuación 1. Los valores finales de metal en solución acuosa se encuentran en tabla 8.

**Tabla 6**

*Recolección de información para el metal cadmio Cu+2*

Corrida	Tiempo (min)	pH	Concentración inicial de cobre (ppm)	Granulometría (mm)	Réplica 1 Concentración adsorbida (ppm)	Réplica 2 Concentración adsorbida (ppm)	Réplica 3 Concentración adsorbida (ppm)	Promedio de Adsorción (ppm)
1	30	2	10.520	0.297	10.317	10.315	10.318	10.317
2	30	5	21.040	0.177	20.623	20.622	20.623	20.623
3	30	8	31.563	0.074	29.395	29.395	29.394	29.395
4	80	2	10.520	0.074	10.423	10.422	10.423	10.423
5	80	5	21.040	0.297	20.512	20.512	20.513	20.512
6	80	8	31.563	0.177	29.397	29.295	29.399	29.364
7	120	2	10.520	0.177	10.516	10.517	10.516	10.516
8	120	5	21.040	0.074	20.568	20.567	20.570	20.568
9	120	8	31.563	0.297	29.284	29.284	29.284	29.284

*Nota.* Los valores adsorbidos se determinaron de acuerdo a la ecuación 1. Los valores finales de metal en solución acuosa se encuentran en tabla 9.

**Tabla 7**

# Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

## *Recolección de información para el metal cadmio Zn+2*

Corrida	Tiempo (min)	pH	Concentración inicial de zinc (ppm)	Granulometría (mm)	Réplica 1 Concentración adsorbida (ppm)	Réplica 2 Concentración adsorbida (ppm)	Réplica 3 Concentración adsorbida (ppm)	Promedio de Adsorción (ppm)
1	30	2	19.180	0.297	19.1378	19.138	19.138	19.138
2	30	5	38.376	0.177	38.0436	38.044	38.043	38.044
3	30	8	57.564	0.074	57.1045	57.104	57.105	57.105
4	80	2	19.180	0.074	19.1139	19.114	19.114	19.114
5	80	5	38.376	0.297	38.2017	38.202	38.202	38.202
6	80	8	57.564	0.177	57.1518	57.152	57.152	57.152
7	120	2	19.180	0.177	19.1468	19.147	19.147	19.147
8	120	5	38.376	0.074	37.258	37.258	37.258	37.258
9	120	8	57.564	0.297	56.9288	56.929	56.929	56.929

*Nota.* Los valores adsorbidos se determinaron de acuerdo a la ecuación 1. Los valores finales de metal en solución acuosa se encuentran en tabla 10.

**Tabla 8**

### *Concentraciones finales de Cd+2 en solución*

Corrida	t (min)	Granulometría (mm)	pH	Concentración inicial Cd (ppm)	Réplica 1 Concentración final (ppm)	Réplica 2 Concentración final (ppm)	Réplica 3 Concentración final (ppm)	Promedio de Concentración final (ppm)	Promedio Concentración final de cadmio (ppm)
1	30	0.297	2	14.570	0.145	0.142	0.148	0.145	0.145
2	30	0.177	5	29.152	0.011	0.013	0.011	0.011	0.011
3	30	0.074	8	43.728	0.629	0.627	0.630	0.629	0.629
4	80	0.074	5	14.570	0.009	0.010	0.009	0.009	0.009
5	80	0.297	8	29.152	0.010	0.012	0.010	0.010	0.010
6	80	0.177	2	43.728	0.295	0.292	0.297	0.295	0.295
7	120	0.177	8	14.570	0.539	0.538	0.540	0.539	0.539
8	120	0.074	2	29.152	0.016	0.018	0.016	0.016	0.016
9	120	0.297	5	43.728	0.822	0.820	0.825	0.822	0.822

*Nota.* Las concentraciones finales se obtuvieron después de estar en contacto el carbón activado

**Tabla 9**

## *Concentraciones finales de Cu+2 en solución*

Corrida	t (min)	pH	Concentración inicial de Cobre (ppm)	Réplica 1 Concentración final (ppm)	Réplica 2 Concentración final (ppm)	Réplica 3 Concentración final (ppm)	Promedio de Concentración final (ppm)	Promedio de Concentración final (ppm)
1	30	2	10.521	0.202	0.206	0.203	0.204	0.204
2	30	5	21.040	0.415	0.418	0.417	0.417	0.417
3	30	8	31.563	2.170	2.168	2.169	2.169	2.169
4	80	5	10.521	0.100	0.099	0.098	0.099	0.099
5	80	8	21.040	0.530	0.528	0.527	0.528	0.528
6	80	2	31.563	2.167	2.168	2.164	2.166	2.166
7	120	8	10.521	0.005	0.004	0.005	0.005	0.005
8	120	2	21.040	0.474	0.473	0.470	0.472	0.472
9	120	5	31.563	2.280	2.278	2.279	2.279	2.279

*Nota.* Las concentraciones finales se obtuvieron después de estar en contacto el carbón activado

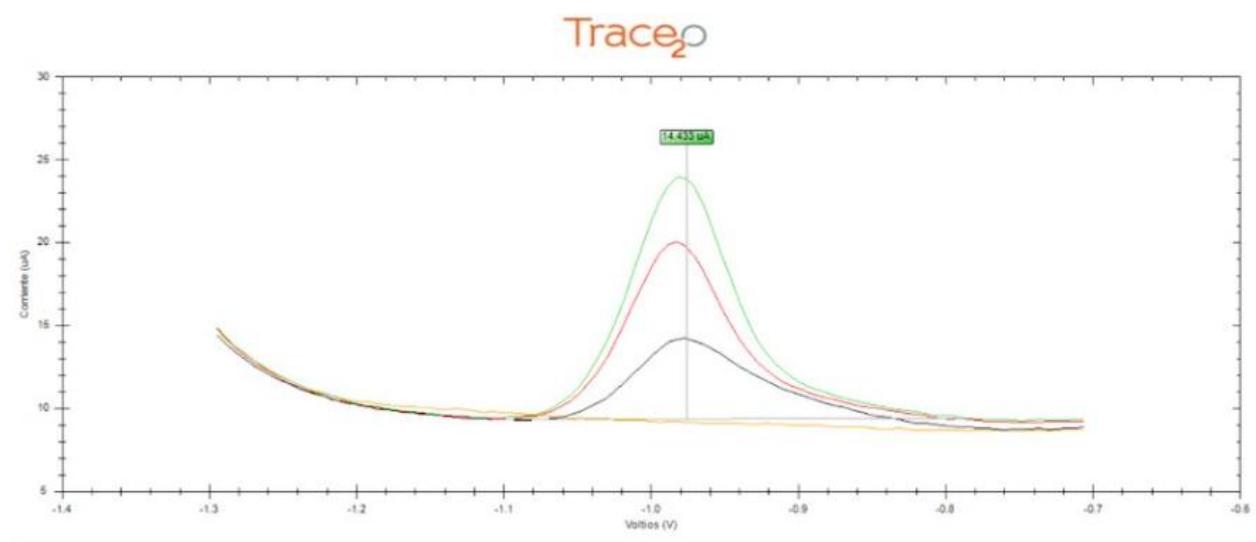
**Tabla 10**

## *Concentraciones finales de Zn+2 en solución*

Corrida	t (min)	pH	Concentración inicial de Zinc (ppm)	Réplica 1 Concentración final (ppm)	Réplica 2 Concentración final (ppm)	Réplica 3 Concentración final (ppm)	Promedio Concentración final (ppm)
1	30	2	19.18	0.0420	0.0422	0.0423	0.0422
2	30	5	38.376	0.3321	0.3324	0.3326	0.3324
3	30	8	57.564	0.4595	0.4597	0.4593	0.4595
4	80	5	19.18	0.0662	0.0660	0.0661	0.0661
5	80	8	38.376	0.1743	0.1740	0.1745	0.1743
6	80	2	57.564	0.4122	0.4120	0.4124	0.4122
7	120	8	19.18	0.0332	0.0330	0.0333	0.0332
8	120	2	38.376	1.1180	1.1182	1.1179	1.1180
9	120	5	57.564	0.6352	0.6354	0.6350	0.6352

*Nota.* Las concentraciones finales se obtuvieron después de estar en contacto el carbón activado

## Curvas de análisis de metales en solución acuosa



*Nota.* Los análisis se realizaron en Equipo Metalyser Benchtop HM5000. Método para zinc T2O AN505 SMWW 3130 B, método para cobre T2O AN504 adaptado SMWW 3130 A, método para cadmio T2O AN501 SMWW 3130 B

### 9.4 Técnicas e instrumentos

Se utilizaron hojas de control que contenían todos los parámetros controlados en los diferentes tratamientos; así mismo las modificaciones en variables independientes.

**Tabla 11**

*Técnicas e instrumentos*

Fase	Actividad	Procedimiento/técnica	Herramientas/instrumentos
Identificación de objeto de estudio	Conceptualización del problema, formulación de estado de arte y diseño de instrumentos	Revisión bibliográfica	Revistas indizadas
	Identificación de datos y objeto	Revisión bibliográfica, trabajo de campo, recolección de datos	Revistas indexadas, hojas de recolección de datos

# Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

Interpretación	Procesamiento de datos	Medición de variables, análisis referentes teóricos	Tabulaciones y gráficas
Análisis de información	Relación de datos	Análisis de datos cuantitativos	Análisis gráficos y estadísticos
Síntesis y conclusiones	Producción de informe	Escritura, redacción, compilación	Documento teórico

*Nota:* el análisis estadístico se encuentra especificado en apartado de diseño experimental. Elaboración propia.

**Tabla 12**

*Operacionalización de las variables o unidades de análisis*

Objetivos específicos	VARIABLES O UNIDADES DE ANÁLISIS QUE SERÁN CONSIDERADAS	FORMA EN QUE SE MEDIRÁN, CLASIFICARÁN O CUALIFICARÁN
Determinar el comportamiento de adsorción de metales pesados al modificar valores de pH	<b>Cuantitativas:</b> ✓ pH ✓ Capacidad de adsorción	<b>Medición:</b> ✓ pH se medirá con potenciómetro ✓ Se determinará concentración final del metal en solución acuosa por método voltamperometría.  <b>Clasificación:</b> Cuantitativa continua, intervalo
Establecer el tiempo óptimo de contacto para adsorción de metales pesados	<b>Cuantitativas:</b> ✓ Tiempo de contacto ✓ Capacidad de adsorción	<b>Medición:</b> ✓ Tiempo de contacto se medirá con cronómetro. ✓ Se medirá concentración final del metal en solución acuosa por método voltamperometría.  <b>Clasificación:</b> Cuantitativa continua, intervalo.

<p>Definir comportamiento de adsorción modificando concentraciones de metales pesados</p>	<p><b>Cuantitativas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Concentración de metales.</li> <li>✓ Capacidad de adsorción de metales</li> </ul>	<p><b>Medición:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Se medirá concentración final del metal en solución acuosa por método voltamperometría</li> <li>✓ Se realizará una diferencia de concentración inicial y final del metal en solución.</li> </ul> <p><b>Clasificación:</b> Cuantitativa continua, intervalo.</p>
<p>Establecer el tamaño de granulometría ideal para adsorción de metales pesados</p>	<p><b>Cuantitativas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Granulometría</li> <li>✓ Capacidad de adsorción de metales</li> </ul>	<p><b>Medición:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Para la granulometría se utilizará tamizador con números de malla 50, 80 y 200.</li> <li>✓ Se medirá concentración final del metal en solución acuosa por método voltamperometría</li> </ul> <p><b>Clasificación:</b> Cuantitativa continua, intervalo.</p>

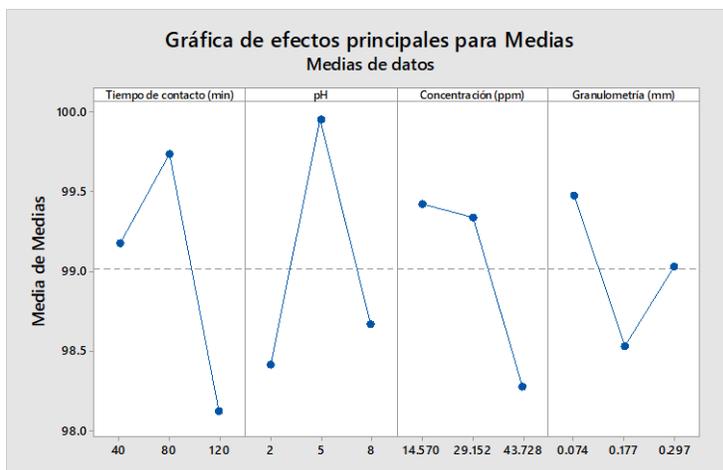
*Nota.* Los indicadores de cada una de las variables serán clave para la capacidad de adsorción de metales pesados en solución acuosa

## 9.5 Procesamiento y análisis de la información

Se utilizó el programa Minitab 17 con licencia para estudiantes, se creó un diseño ortogonal de Taguchi. Con el programa se logró analizar el diseño y predecir los resultados; los cuales indicaron los valores ideales para obtener la mejor adsorción con carbón activado. Se analizaron varianzas de relación señal/ruido y varianzas de medias.

**Figura 9**

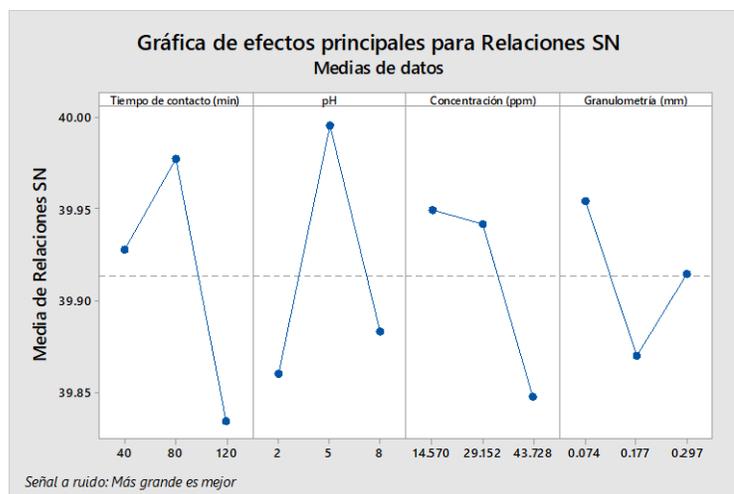
*Comportamiento de los niveles y factores en adsorción del metal Cd+2 para las medias*



*Nota.* La gráfica se obtuvo del programa Minitab 17 con licencia para estudiantes.

**Figura 10**

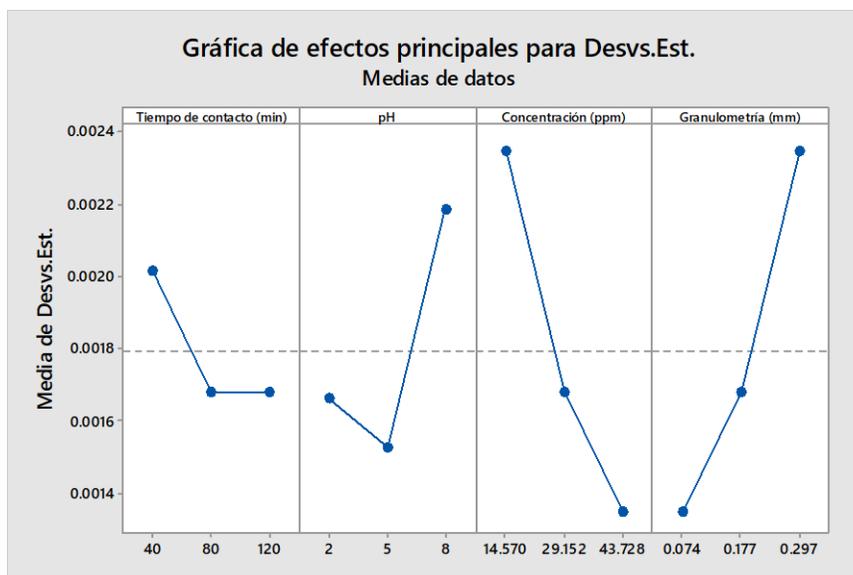
*Comportamiento de los niveles en cada factor para relación señal/ruido en metal Cd+2*



*Nota.* La gráfica se obtuvo del programa Minitab 17 con licencia para estudiantes.

**Figura 11**

*Análisis de efectos principales de desviación estándar para Cd+2*



*Nota.* La gráfica se obtuvo del programa Minitab 17 con licencia para estudiantes

**Tabla 13**

*Valores de los análisis de varianza y desviación estándar para Cd+2*

Corrida	Sm	VAR	(Sm - Ve)/nve	Desviación estándar	Media
1	624.242	4.506E+01	8.699E+03	0.0030	14.425
2	2547.535	1.842E+02	1.451E+05	0.0015	29.141
3	5572.658	4.020E+02	6.929E+05	0.0015	43.099
4	636.068	2.788E+01	5.653E+03	0.0010	14.561
5	2547.710	1.457E+02	1.167E+05	0.0015	29.142
6	5659.363	3.503E+02	6.199E+05	0.0025	43.433
7	590.607	1.236E+01	2.382E+03	0.0010	14.031
8	2546.661	1.117E+02	9.065E+04	0.0015	29.136
9	5522.689	2.874E+02	5.015E+05	0.0025	42.906

*Nota.* Los valores se obtuvieron del programa Minitab 17 con licencia para estudiantes.

**Tabla 14**

Resultados experimentales y relación S/R para biosorción del metal Cd+2

Corrida	Tiempo de contacto (min)	pH	Concentración (ppm)	Granulometría (mm)	% Adsorción del metal	S/R
1	40	2	14.57	0.297	99.005	39.9131
2	40	5	29.152	0.177	99.961	39.9966
3	40	8	43.728	0.074	98.562	39.8742
4	80	2	29.152	0.074	99.938	39.9946
5	80	5	43.728	0.297	<b>99.965</b>	<b>39.9969</b>
6	80	8	14.57	0.177	99.326	39.9413
7	120	2	43.728	0.177	96.301	39.6726
8	120	5	14.57	0.074	99.944	39.9951
9	120	8	29.152	0.297	98.119	39.8351

*Nota.* Los valores se obtuvieron del programa Minitab 17 con licencia para estudiantes.

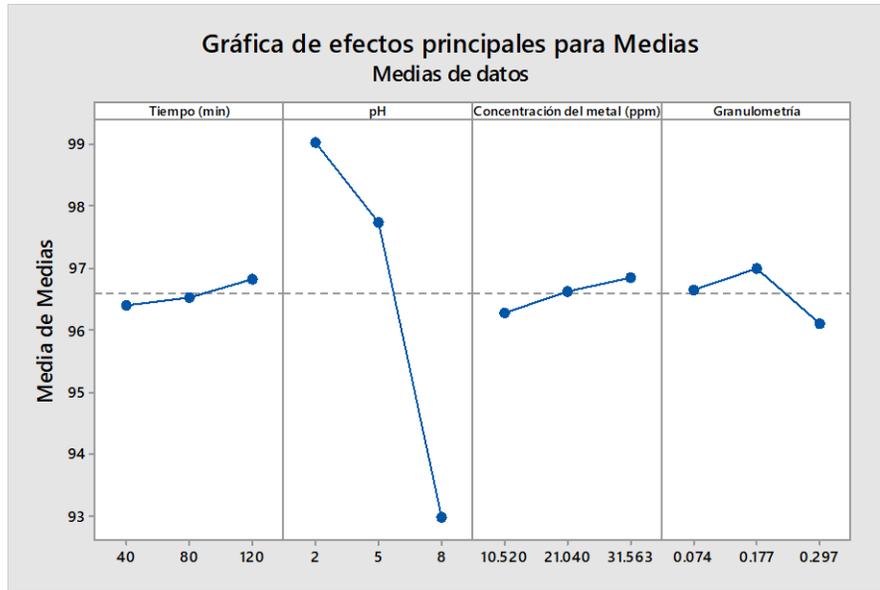
**Tabla 15**

Respuestas para relaciones señal/ruido, más grande es mejor para Cd+2

Nivel	Tiempo de contacto (min)	pH	Concentración (ppm)	Granulometría (mm)
1	39.93	39.86	<b>39.95</b>	<b>39.95</b>
2	<b>39.98</b>	<b>40</b>	39.94	39.87
3	39.83	39.88	39.85	39.92
Delta	0.14	0.14	0.1	0.08
Clasificar	1	2	3	4

**Figura 12**

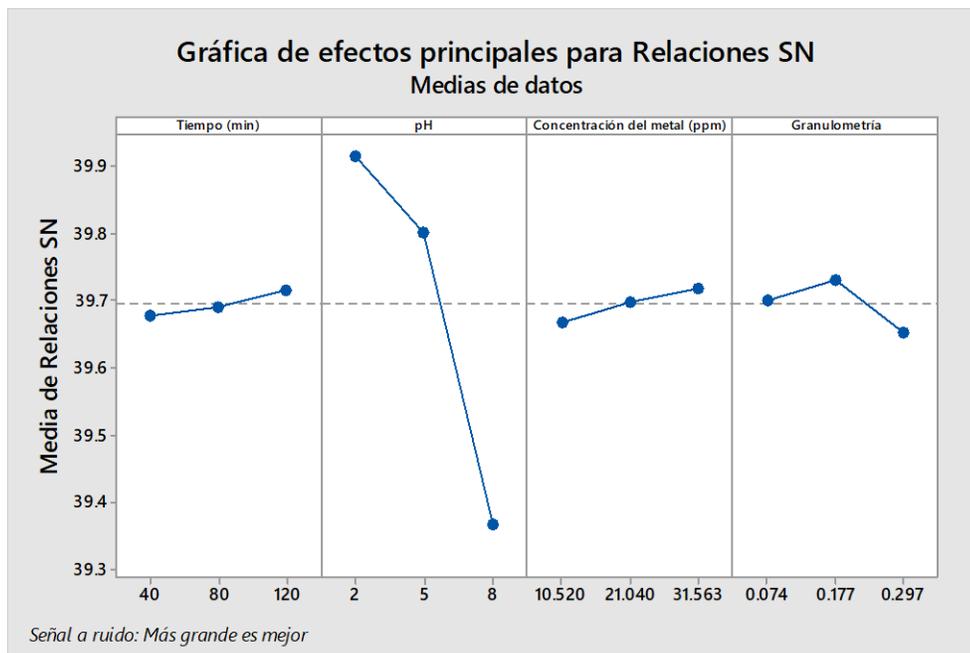
*Comportamiento de los factores en los distintos niveles para Cu+2 en las medias*



*Nota.* La gráfica se obtuvo del programa Minitab 17 con licencia para estudiantes

**Figura 13**

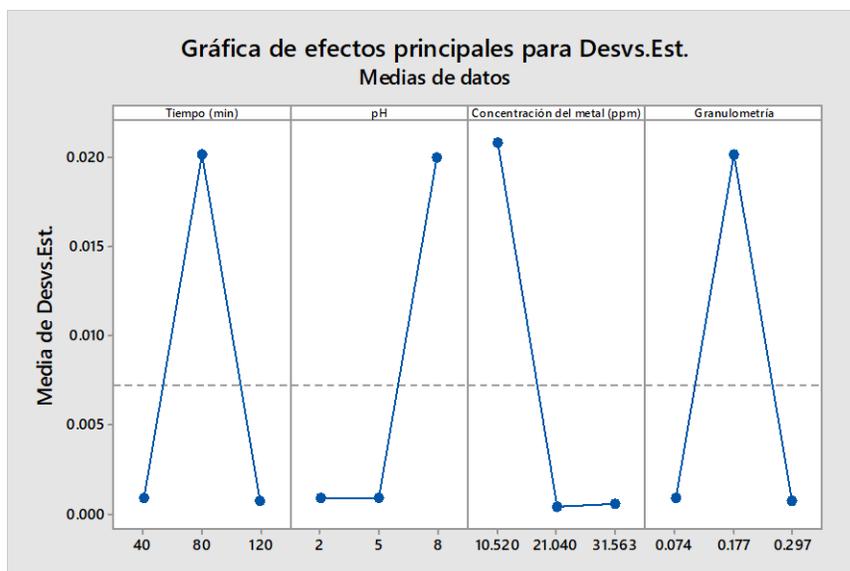
*Comportamiento de los factores en cada nivel para señal/ruido en Cu+2*



*Nota.* La gráfica se obtuvo del programa Minitab 17 con licencia para estudiantes

**Figura 14**

*Análisis de efectos principales para desviación estándar del Cu+2*



*Nota.* Los cálculos se realizaron en programa Minitab 17 con licencia para estudiantes

**Tabla 16**

*Valores de los análisis de varianza y desviación estándar para Cu+2*

Corrida	Promedio (Pi)	Sm	VAR	(Sm - Ve)/nve	Desviación estándar	Media
1	10.317	319.301	2.170E+01	2.153E+03	0.0015	98.067
2	20.623	1275.883	8.670E+01	3.437E+04	0.0006	98.016
3	29.395	2592.139	1.742E+02	1.404E+05	0.0006	93.130
4	10.423	325.896	1.031E+01	1.085E+03	0.0006	99.075
5	20.512	1262.267	6.016E+01	2.411E+04	0.0006	97.492
6	29.364	2586.675	1.365E+02	1.115E+05	0.0595	93.032
7	10.516	331.780	3.091E+00	3.387E+02	0.0006	99.965
8	20.568	1269.169	3.949E+01	1.619E+04	0.0015	97.758
9	29.284	2572.658	1.029E+02	8.468E+04	0.0000	92.780

*Nota.* Los valores se obtuvieron del programa Minitab 17 con licencia para estudiantes

**Tabla 17**

*Resultados experimentales y relación S/R para biosorción del metal Cu+2*

Corrida	Tiempo de contacto (min)	pH	Concentración (ppm)	Granulometría (mm)	% Adsorción del metal	S/R
1	40	2	10.520	0.297	98.067	39.830
2	40	5	21.040	0.177	98.016	39.826
3	40	8	31.563	0.074	93.130	39.382
4	80	2	10.520	0.074	99.075	39.919
5	80	5	21.040	0.297	97.492	39.779
6	80	8	31.563	0.177	93.032	39.373
7	120	2	10.520	0.177	<b>99.965</b>	<b>39.997</b>
8	120	5	21.040	0.074	97.758	39.803
9	120	8	31.563	0.297	92.780	39.349

*Nota.* Los valores se obtuvieron del programa Minitab 17 con licencia para estudiantes

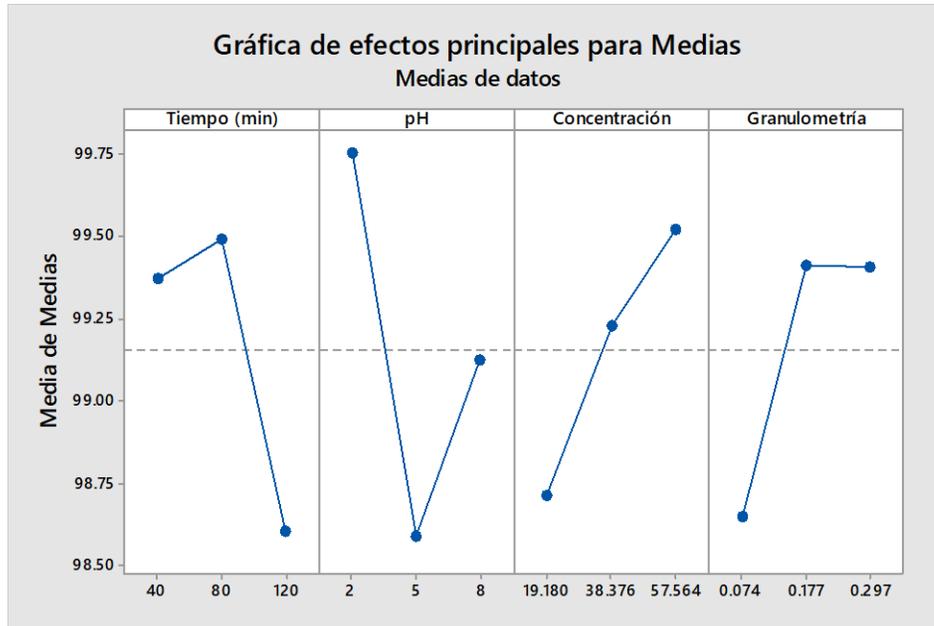
**Tabla 18**

*Respuestas para relaciones señal/ruido, más grande es mejor para Cu+2*

Nivel	Tiempo de contacto (min)	pH	Concentración (ppm)	Granulometría (mm)
1	39.680	<b>39.920</b>	39.670	39.700
2	39.690	39.800	39.700	<b>39.730</b>
3	<b>39.720</b>	39.370	<b>39.720</b>	39.650
Delta	0.040	0.550	0.050	0.080
Clasificar	4	1	3	2

**Figura 15**

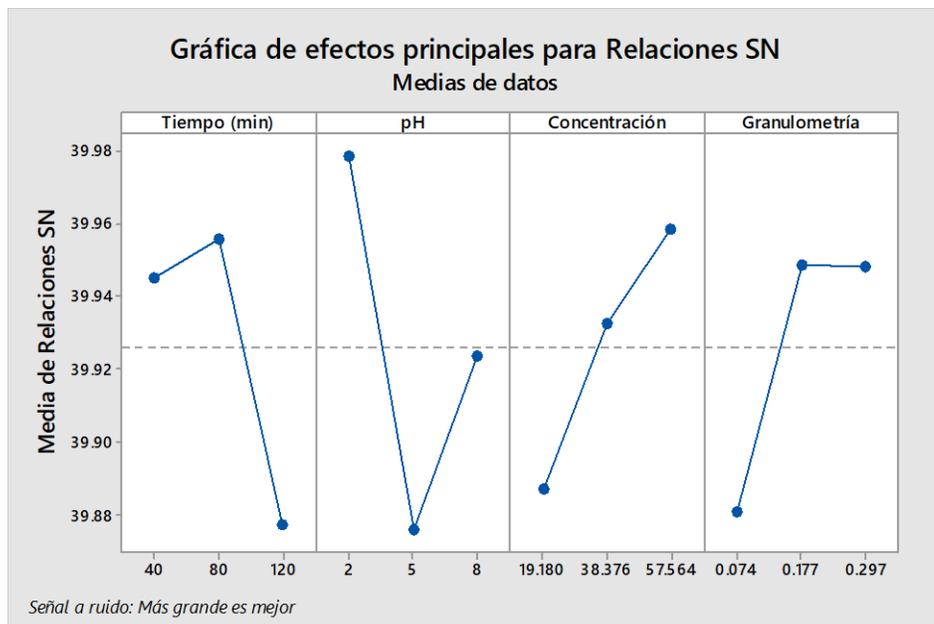
*Comportamiento de los factores en los distintos niveles para Zn+2 en las medias*



*Nota.* La gráfica se obtuvo del programa Minitab 17 con licencia para estudiantes

**Figura 16**

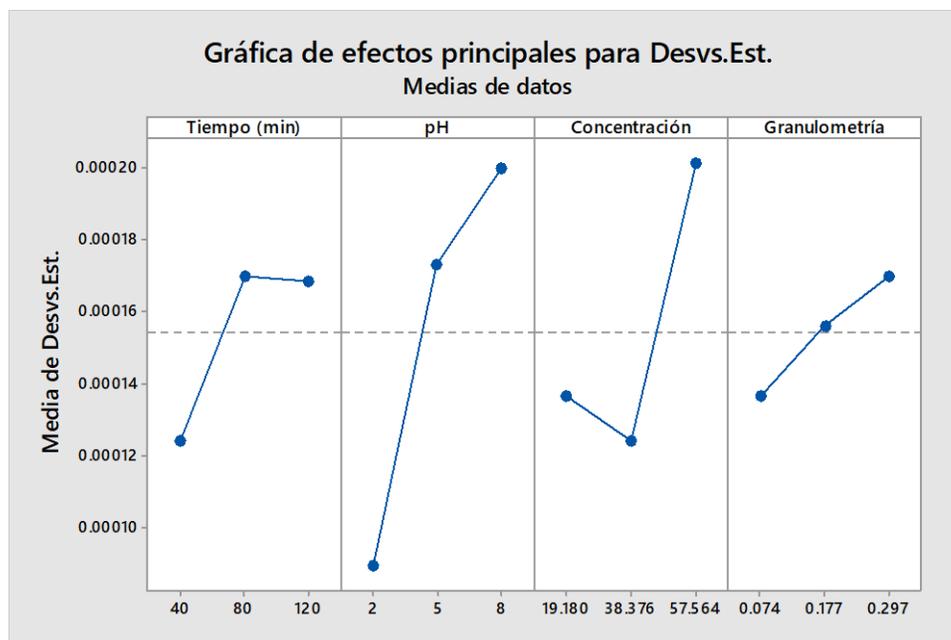
*Comportamiento de los factores en cada nivel para señal/ruido en Zn+2*



*Nota.* La gráfica se obtuvo del programa Minitab 17 con licencia para estudiantes

**Figura 17**

*Análisis de efectos principales para desviación estándar del Zn+2*



*Nota.* Los cálculos se realizaron en programa Minitab 17 con licencia para estudiantes

**Tabla 19**

*Valores de los análisis de varianza y desviación estándar para Zn+2*

Corrida	Sm	VAR	(Sm - Ve)/nve	Desviación estándar	Media
1	1098.762	8.224E+01	2.787E+04	0.00006	99.780
2	4341.931	3.248E+02	4.349E+05	0.00012	99.134
3	9782.772	7.318E+02	2.208E+06	0.00020	99.202
4	1096.027	5.711E+01	1.978E+04	0.00006	99.656
5	4378.117	2.756E+02	3.769E+05	0.00025	99.546
6	9798.985	6.541E+02	1.994E+06	0.00020	99.284
7	1099.804	3.689E+01	1.307E+04	0.00015	99.827
8	4164.468	2.140E+02	2.818E+05	0.00015	97.087
9	9722.665	5.743E+02	1.751E+06	0.00020	98.897

*Nota.* Los valores se obtuvieron del programa Minitab 17 con licencia para estudiantes

**Tabla 20**

*Resultados experimentales y relación S/R para biosorción del metal Zn+2*

Corrida	Tiempo de contacto (min)	pH	Concentración (ppm)	Granulometría (mm)	% Adsorción del metal	S/R
1	40	2	10.520	0.297	99.780	39.981
2	40	5	21.040	0.177	99.134	39.924
3	40	8	31.563	0.074	99.202	39.930
4	80	2	10.520	0.074	99.656	39.970
5	80	5	21.040	0.297	99.546	39.960
6	80	8	31.563	0.177	99.284	39.938
7	120	2	10.520	0.177	<b>99.827</b>	<b>39.985</b>
8	120	5	21.040	0.074	97.087	39.743
9	120	8	31.563	0.297	98.897	39.904

*Nota.* Los valores se obtuvieron del programa Minitab 17 con licencia para estudiantes

**Tabla 21**

*Respuestas para relaciones señal/ruido, más grande es mejor para Zn+2*

Nivel	Tiempo de contacto (min)	pH	Concentración (ppm)	Granulometría (mm)
1	39.950	<b>39.980</b>	39.890	39.880
2	<b>39.960</b>	39.880	39.930	<b>39.950</b>
3	39.880	39.930	<b>39.960</b>	39.950
Delta	0.080	0.100	0.070	0.070
Clasificar	2	1	3	4

**Tabla 22**

*Parámetros de modelos cinéticos de pseudo primer y segundo orden*

	Modelo cinético Seudo primer orden			Modelo cinético Seudo segundo orden	
	Nivel	K	R <sup>2</sup>	K	R <sup>2</sup>
Cd+2	1	-1.00E-04	0.452	<b>4.04E-05</b>	0.999
	2	-8.00E-07	0.542	<b>6.73E+00</b>	1
	3	-2.00E-05	0.092	<b>1.08E-01</b>	0.999
Cu+2	1	0.00001	0.2987	<b>2.16E-01</b>	1
	2	0.00009	0.9993	<b>2.63E+00</b>	1
	3	0.00002	0.9051	<b>3.47E-01</b>	1
Zn+2	1	0.000002	0.0418	<b>3.50E+00</b>	1
	2	-0.0001	0.5423	<b>7.38E-02</b>	0.9995
	3	-0.00001	0.4954	<b>3.24E-01</b>	1

*Nota.* De acuerdo a los valores de R<sup>2</sup>, se identificó que el modelo cinético de segundo orden fue el que más se adaptó a los resultados de adsorción.

**Tabla 23**

*Valores de capacidad de adsorción del carbón activado para el metal Cd+2*

Cd+2 (g)	Carbón activado (g)	Tiempo de contacto (min)	Capacidad adsortiva (mg/g)
0.003644	0.5	30	7.215470144
0.007288	0.5	30	14.57053326
0.010932	0.5	30	21.54966667
0.003644	0.5	80	7.283498147
0.007288	0.5	80	14.57103326
0.010932	0.5	80	21.71666667
0.003644	0.5	120	7.018389019
0.007288	0.5	120	14.56803322
0.010932	0.5	120	21.45283333

**Tabla 24***Valores de capacidad de adsorción del carbón activado para el metal Cu+2*

---

<b>Cu+2 g</b>	<b>Carbón activado (g)</b>	<b>Tiempo de contacto (min)</b>	<b>Capacidad adsorptiva (mg/g)</b>
0.002630	0.5	30	5.158843
0.005260	0.5	30	10.311333
0.007891	0.5	30	14.697240
0.002630	0.5	80	5.211848
0.005260	0.5	80	10.256167
0.007891	0.5	80	14.681740
0.002630	0.5	120	5.258686
0.005260	0.5	120	10.284167
0.007891	0.5	120	14.641907

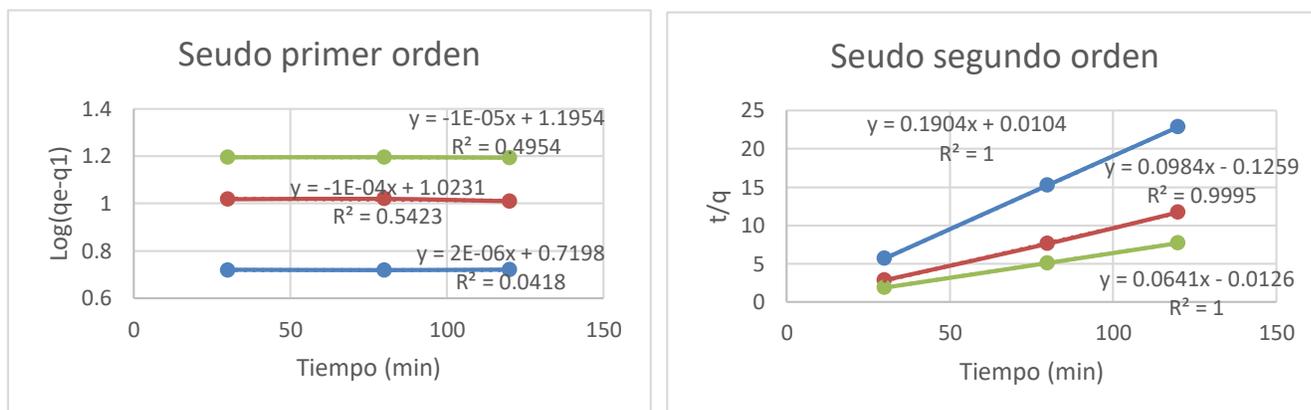
**Tabla 25***Valores de capacidad de adsorción del carbón activado para el metal Zn+2*

---

<b>Zn+2 g</b>	<b>Carbón activado (g)</b>	<b>Tiempo de contacto (min)</b>	<b>Capacidad adsorptiva (mg/g)</b>
0.002630	0.5	30	5.24894
0.005260	0.5	30	10.42886
0.007891	0.5	30	15.65543
0.002630	0.5	80	5.24240
0.005260	0.5	80	10.47223
0.007891	0.5	80	15.66839
0.002630	0.5	120	5.25142
0.005260	0.5	120	10.21351
0.007891	0.5	120	15.60726

**Figura 18**

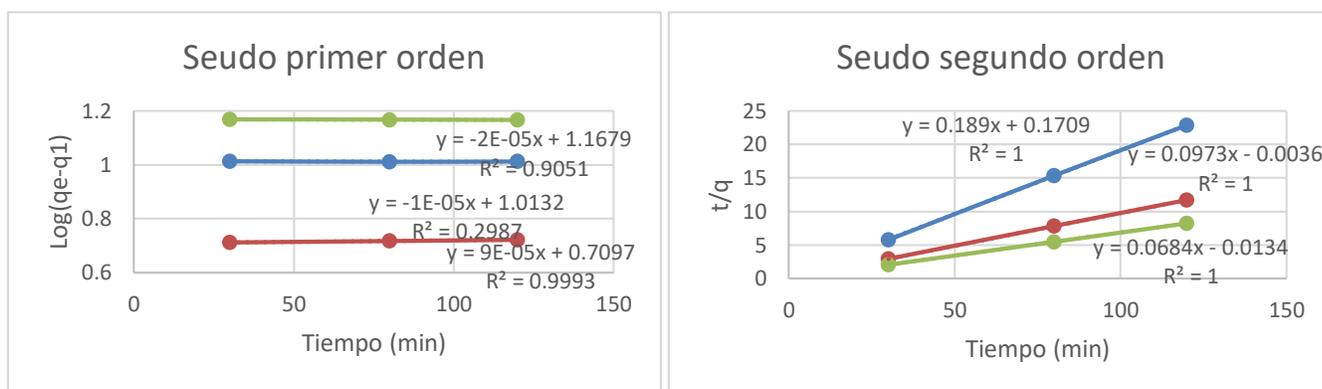
*Gráficas de modelo cinético para ión metálico Zn<sup>+2</sup>*



*Nota.* Los valores de las constantes de velocidad de adsorción se determinaron a partir de la pendiente e intercepto de las gráficas.

**Figura 19**

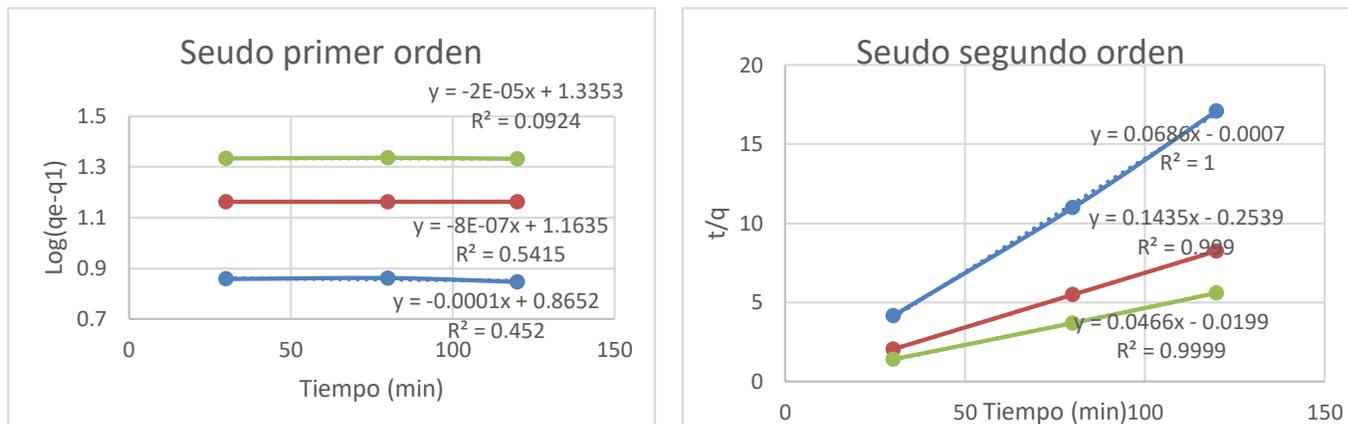
*Gráficas de modelo cinético para ión metálico Cu<sup>+2</sup>*



*Nota.* Los valores de las constantes de velocidad de adsorción se determinaron a partir de la pendiente e intercepto de las gráficas.

**Figura 20**

Gráficas de modelo cinético para ión metálico Cd+2



*Nota.* Los valores de las constantes de velocidad de adsorción se determinaron a partir de la pendiente e intercepto de las gráficas.

## 10 Resultados y discusión

### 10.1 Resultados

Se determinó que el carbón activado obtenido de cáscara de cardamomo tuvo una adsorción máxima en solución acuosa del metal Cd+2 del 99.96% ver tabla 14, para el metal Cu+2 una adsorción máxima del 99.96% ver tabla 17 y para el metal Zn+2 una adsorción máxima de 99.82% ver tabla 20. De acuerdo a la predicción de resultados de Taguchi, la mejor combinación de los parámetros controlables para obtener la mayor capacidad de adsorción para cada ión metálico en solución acuosa se encuentra en tabla 26. De acuerdo a figuras X Y, se determinó que el modelo cinético que más se adaptó a este proceso de adsorción fue el de seudo segundo orden, calculándose la constante de velocidad de adsorción a partir de la gráfica lineal de t/q en función del tiempo, los coeficientes de correlación permitieron elegir el mejor modelo. La isoterma de adsorción que se utilizó fue la de Langmuir. Con estos resultados se puede confirmar que el carbón activado es altamente efectivo para adsorber estos 3 metales en solución acuosa, lo cual podría implementarse en plantas de tratamiento de aguas y aguas residuales e inclusive filtros de agua potable.

**Tabla 26**

*Resultados de los niveles ideales para mayor biosorción de los metales en solución acuosa*

	Tiempo de contacto (min)	pH	Concentración (ppm)	Granulometría (mm)
Cd+2	80	5	14.57	0.297
Cu+2	120	2	10.52	0.297
Zn+2	80	2	57.564	0.177

*Nota.* Los resultados se obtuvieron de acuerdo a predicción de Taguchi y a interpretación de las gráficas S/N para cada metal.

**Tabla 27**

*Resultados de porcentaje de adsorción de los iones metálicos en solución acuosa*

Ión metálico	% Adsorbido por carbón activado	Cantidad adsorbida mg/g
Cd+2	99.96	21.80
Cu+2	99.96	15.60
Zn+2	99.82	28.60

## 10.2 Discusión de resultados:

Se determinó que la capacidad de adsorción de metales pesados en solución acuosa, utilizando carbón activado a partir de cáscara de cardamomo, tiene excelentes condiciones de adsorción para los iones de metales estudiados. En los análisis de adsorción del ión Cd+2 se obtuvo un valor de 21.8 mg/g en la monocapa del carbón activado, valor que es aceptable porque al compararlo con carbón activado derivado de bagazo de caña, según García y colaboradores (2020) especificaron que “la capacidad de adsorción del bagazo de caña de azúcar variedad Roxa es de 10.6 mg/g para ión Cd+2” (p.96). Para el ión Cu+2 se obtuvo una capacidad de adsorción de 15.6 mg/g, lo cual indicó que se encuentra dentro de los rangos comerciales según lo mostrado por Shahrokhi-Shahrakhi y colaboradores sobre “la capacidad de adsorción del ión Cu+2 en carbones comerciales es de 15 mg/g”(p.13). La capacidad de adsorción del ión Zn+2 fue de 28.60 mg/g y “los carbones comerciales tienen capacidades de adsorción de 14 mg/g de iones Zn+2”(Shahrokhi-Shahrakhi et al., 2021). Los resultados de adsorción se encontraron con valores arriba del 99% como se puede observar en tabla 27; lo cual indica que el carbón activado es capaz de remover los iones Cd+2, Cu+2 y Zn+2 en soluciones acuosas, Deng y colaboradores indicaron que “el carbón activado obtenido de cáscara de coco removió un 96.5% de Cd+2 en solución y 98% de Cd+2” donde el valor más apropiado de pH fue de 5. Se determinó que el modelo cinético que más se adaptó fue el de pseudo segundo y orden y la isoterma más adecuada fue de Langmuir, de

acuerdo a Duan, Wong y Zhou (2020) indicaron que “la isoterma de Langmuir se usa con más frecuencia en estudios de adsorción de metales pesados y el mejor ajuste de modelo de cinética de adsorción es de pseudo segundo orden” (p. 2); por tanto, se cumple con lo descrito en la teoría. En las gráficas de medias de señal/ruido, se logró observar el efecto que tuvieron los distintos factores en la adsorción de los iones metálicos, determinando que el factor pH fue el más importante porque sus valores delta fueron 0.1 Zn<sup>+2</sup>, 0.55 para Cu<sup>+2</sup> y 0.14 para Cd<sup>+2</sup>, en el año 2020 expusieron que para la adsorción de cationes de metales pesados, los adsorbentes a base de carbono deberían ser más ácidos para un funcionamiento más amplio (Duan et al., 2020, p. 3). Para el factor de concentración, se observó que el nivel 3; siendo el de mayor concentración inicial, fue el segundo factor más importante; debido a que existió mayor capacidad de adsorción y según Duan et. al., (2020) “a mayor concentración inicial contribuye a un aumento de la transferencia de energía de la solución a la superficie de los materiales a base de carbono” (p. 4). En el tiempo de contacto se observó que a mayor tiempo iba disminuyendo la adsorción, esto ocurre porque según Gupta y Parihar después de un tiempo “el número de sitios de enlaces vacantes es muy corto y estos sitios son difíciles de ocupar por los iones debido a las fuerzas repulsivas entre el ión metálico en la superficie sólida y la fase líquida” (p. 290). Para el tamaño de granulometría se determinó que fue el factor que menos afectó para el proceso de adsorción; debido a que los 3 niveles utilizados se encontraron muy cercanos y por ello la predicción de Taguchi lo clasificó como el último factor más importante.

## 11 Referencias

- Albarado-Tabachi, (2018) *Identificación de modelos Wiener y Hammerstein aplicados al diseño de un control PID predictivo de Ph* (Tesis de Máster) Universidad de Piura, Facultad en Ingeniería Mecánico-Eléctrica con mención en Automática y Optimización, Perú.  
[https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3824/MAS\\_IME\\_AUT\\_032.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3824/MAS_IME_AUT_032.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
- Albis, A. R., Arzuza, S. A., & Mosquera, A. M. (2019). Remoción de mercurio (II) en solución acuosa usando residuo industrial de yuca (Manihot esculenta). *Prospectiva*, 17(2), 33-39.  
<http://dx.doi.org/10.15665/rp.v17i2.1951>

Burciaga-Montemayor, N., Claudio-Rizo, J., Cano-Salazar, L., Martínez-Luévanos, A., & Vega-Sánchez, P. (2020). Compósitos en estado hidrogel con aplicación en la adsorción de metales pesados presentes en aguas residuales. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 23(1), 1-13. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.211>

Castellar, G. C., & García, A. A. (2011). Remoción de Pb<sup>2+</sup> en disolución acuosa sobre carbón activado en polvo: Estudio por lote. *Prospectiva*, 9(1), 59-68. ISSN-e 2216-1368

Castillo, M. (24 de octubre de 2019). Agonizan 3 ríos en Huehuetenango. Prensa Libre. Recuperado de <https://www.pressreader.com/guatemala/prensa-libre/20191024/282389811265256>

CHEMLIST (2020). Regulated Chemicals listing. A Division of the American Chemical Society. Recuperado el 30 de junio de 2020, de <https://www.cas.org/support/documentation/regulated-chemicals>

Duan, C., Ma T., Wang J., & Zhou Y. (2020). Removal of heavy metals from aqueous solution using carbon-based adsorbents: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 37(1), 101339. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101339>

Deng Z., Sun S., Li H., Pan D., Rangrao R., Guo Z., & Seok I. (2021). Modification of coconut shell-bases activated carbon and purification of wastewater. *Adv Compos Hybrid Mater*, 4(1), 65-73. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00205-4>

European Environment Agency (2018). Industrial waste wáter treatment pressures on Europe´s environment. EEA Report, No.23. ISSN 1977-8449

Fernández-González, R., Martín-Lara, M. A., Blázquez, G., Pérez, A., & Calero, M. (2019). Recovering metals from aqueous solutions by biosorption onto hydrolyzed olive cake. *Water*, 11(12), 2519. [doi.org/10.3390/w11122519](https://doi.org/10.3390/w11122519)

Fernández, R. (2019). Eliminación de metales pesados mediante biosorción: Desarrollo de procesos de tratamientos para aguas residuales industriales. [Tesis Doctorales, Universidad de Granada]. <http://hdl.handle.net/10481/62268>

García, J., Geulammusein, N., Leiva A., Martínez E., & Enríquez M. (2020). Adsorción de cadmio desde soluciones acuosas en carbón activado de bagazo de caña de azúcar variedad Roxa. *Revista Centro Azúcar*, 47(1), 90-99. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2223-48612020000100090&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612020000100090&lng=es&tlng=es).

González, L. (2003). Antisépticos y Desinfectantes. *Educación Sanitaria*, 22(3), 64-70. <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-pdf-13044452>

Gupta V., Dave S., & Parihar N. (2020). Removal of Copper (II) from aqueous solutions using chemically activated banana peels as an adsorbent. *Adsorption*, 100(1). 287-291.  
<http://www.envirobiotechjournals.com/PR/v29i220/Poll%20Res-14.pdf>

Huerta, S. (2019). Adsorción. [Manual , Universidad Autónoma Metropolitana] p. 1-31.  
<http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/sho/Adsorcion.pdf>

Ihsanullah, I., Sajid, M., Kabeer, M., Shemsi, A. M., & Atieh, M. A. (2020). First Investigations on the Removal of Tungsten Species from Water Using Multi-walled Carbon Nanotubes. *Water Air Soil Pollut*, 231, 119. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04485-2>

Lima, E. C., Hosseini-Bandegharai, A., Moreno-Piraján, J. C., & Anastopoulos, I. (2018). A critical review of the estimation of the thermodynamic parameters on adsorption equilibria. Wrong use of equilibrium constant in the Van't Hoof equation for calculation of thermodynamic parameter of adsorption. *Journal of Molecular Liquids*, 273(1), 425-434. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.048>

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (2021). Guatemala promueve uso responsable y correcto de agroquímicos (p. 1). Recuperado de <https://guatemala.gob.gt/guatemala-promueve-uso-responsable-y-correcto-de-agroquimicos/>

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2016). Informe Ambiental del Estado de Guatemala 2016 (p. 121). Recuperado de

<https://www.marn.gob.gt/Multimedios/8879.pdf>

Nájera, E. (2007). Diseño 34-2 aplicado en la preparación de películas del sistema Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O [Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Física y Matemática] <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/5916>

Naushad, M., Alqadami, A. A., Alothman, Z. A., Alsohaimi, I. H., Algamdi, M. S., & Aldawsari, A. M. (2019). Adsorption kinetics, isotherm and reusability studies for the removal of cationic dye from aqueous medium using arginine modified activated carbon. *Journal of Molecular Liquids*, 293(1), 111442. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111442>

Nicolás-Méndez, T., Ortiz-Muñiz, A. R., Mendoza-Núñez, M. M., & García-Rodríguez, M. C. (2020). El papel del resveratrol sobre el estrés oxidante inducido por metales pesados. *Nutrición Hospitalaria*, 37(2), 374,383. DOI: <http://dx.doi.org/10.20960/nh.02846>

Obregón, D. (2012). Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de cadmio utilizando carbones activados preparados a partir de semilla de aguaje y aceituna [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/5717>

Palacio, O., Chávez, A., & Velásquez, Y. L. (2016). Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados. *Revista Tecnura*, 21(53), 96-106. <https://doi.org/10.14483/22487638.8195>

Ríos, J., Aburto, A., & Ortega, F. (2020). Uso de herramientas estadísticas en nanotecnología del carbono. *Milenaria, Ciencia y Arte*, 9(15), 25-27. Recuperado de <http://milenaria.umich.mx/ojs/index.php/milenaria/article/view/108/48>

Shahrokhi-Shahraki, R., Benally C., El-Din, M., & Park J. (2021). High efficiency removal of heavy metals using tire-derived activated carbon vs comercial activated carbon: Insights into the adsorption mechanisms. *Chemosphere*, 264(1), 12-13. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128455>

Silvestre, A., Silvestre, J., Sepulveda, A., & Rodríguez, F. (2009). Ethanol removal using activaed carbón: Effect of porous structure and Surface chemistry. *Microporous and Mesoporous Materials*, 120(1), 62-68.

Spillman, T., Webster, T., Alas, H., Waite, L., & Buckalew, J. (2020). Evaluación de recursos de agua en Guatemala. (p. 18). Recuperado de <https://www.sam.usace.army.mil/Portals/46/docs/military/engineering/docs/WRA/Guatemala/Guatemala%20WRA%20Spanish.pdf>

Tejada-Tovar, C., Villabona, A., & Ramírez-Vásquez, P. (2020). Valorización de residuos de la obtención de almidón de ñame espino para su uso como bioadsorbente en la remoción de cromo (VI) y níquel (II). *INGE CUC*, 16(1), 17-22.

Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortíz, & Osorio-García, L. (2020). Estudio del efecto de la temperatura, concentración inicial de contaminante y dosis de adsorbente en la remoción de Níquel (II) usando residuos agroindustriales. *Prospectiva*, 18(1), 24-31.  
<https://doi.org/10.15665/rp.v18i1.2071>

Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortíz, A., & Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecno Lógicas*, 18(34), 109-123. ISSN 0123-7799

Timberlake, K. (2013). *Química general, orgánica y biológica* (4ª. ed.). México: Pearson.

## 12 Apéndice

### Figura 29

*Proceso de preparación de carbón activado*



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

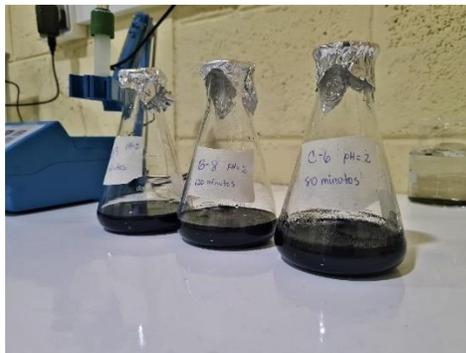


(f)

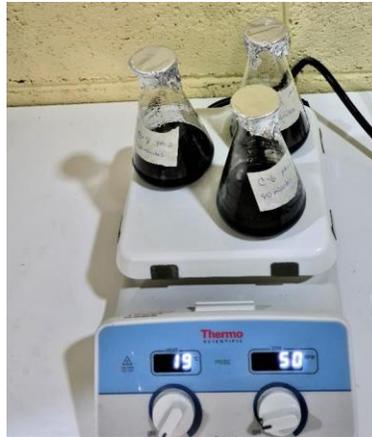
*Nota.* (a) Secado, (b) triturado y tamizado, (c) activación química, (d) horno, (e) filtración, (f) carbón activado.

**Figura 30**

*Proceso de contacto de solución acuosa y metal*



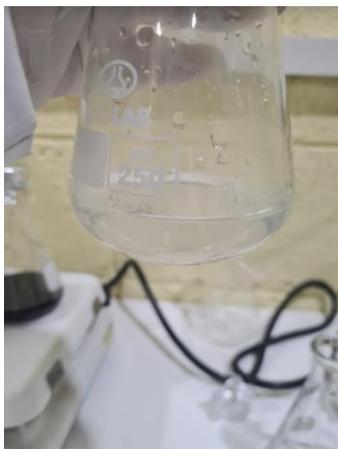
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

*Nota.* (a) contacto de solución acuosa que contiene metal con carbón activado, (b) agitación, (c) filtración, (d) solución filtrada, (e) muestras con distintos metales.

**Figura 31**

*Análisis de cantidad de metal en solución acuosa*



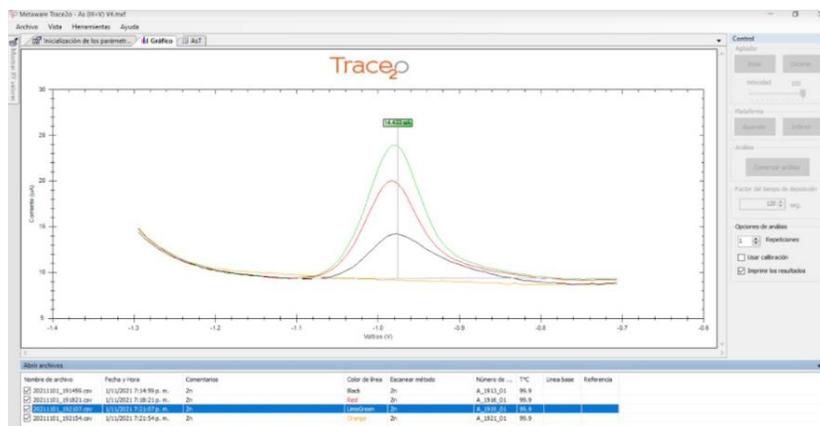
(a)



(b)



(c)



(d)

*Nota.* (a) mezcla de reactivos con solución acuosa, (b) equipo para análisis, (c) determinación de concentración de metales, (d) gráfica de concentración de metales.

### 13 Aspectos éticos y legales (si aplica)

No aplica

### 14 Vinculación

No aplica.

### 15 Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual

La estrategia para difundir los conocimientos generados es a través de la página web del ITIC, redes sociales de la página de Ingeniería CUNOR y a través de los esfuerzos generados por parte de la Dirección General de Investigación.

### 16 Aporte de la propuesta de investigación a los ODS:

El objetivo de desarrollo sostenible (ODS) al cual impacta esta investigación es el de agua limpia y saneamiento, ya que se podrá implementar en plantas de tratamiento o filtros de agua potable.

### 17 Orden de pago final

Nombres y apellidos	Categoría (investigador /auxiliar)	Registro de personal	Procede pago de mes (Sí / No)	Firma
Edgar Arnoldo Sierra Dubón	Auxiliar II		Sí	

### 18 Declaración del coordinador(a) del proyecto de investigación

El coordinador de proyecto de investigación con base en el *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación*, artículos 13 y 20, deja constancia que el personal contratado para el proyecto de investigación que coordina ha cumplido a satisfacción con la entrega de informes individuales por lo que es procedente hacer efectivo el pago correspondiente.

# Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

## Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

Karen Elizabeth Vásquez Villeda

Firma

Fecha: 19/10/2022

Karen E. Vásquez V.  
Ingeniera Química  
Colegiado No. 1827

### 19 Aval del director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 13 y 19 del Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación otorgo el aval al presente informe mensual de las actividades realizadas en el proyecto Biosorción de metales pesados utilizando carbón activado obtenido de cáscara de cardamomo, en mi calidad Director del Centro Universitario del Norte, mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

Vo.Bo. Lic. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales

Firma

Fecha: 19/01/2022



### 20 Visado de la Dirección General de Investigación

Vo.Bo. Ing. Julio Rufino Salazar

Firma

Fecha: 19/01/2022

Vo.Bo. Ing. Julio Rufino Salazar

Firma

Fecha: 19/01/2022