



Área de Conocimiento de Agricultura

**ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE
ADSORCIÓN DE PLOMO, COBRE Y ZINC
EN SEMILLA DE *MORINGA OLEÍFERA***

**Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Químico**

Elaborado por:

Br. Yesenia Lucia
Córdobas
CARNET: 2009-29028

Br. Mariheylin Ruiz
Sánchez
Carnet: 2009-29376

TUTOR MPhil. Martha
Elizabeth Benavente
Silva

10 de abril de 2025
Managua, Nicaragua

10 de abril del 2025

M.Sc. Ing José Mamerto Méndez Úbeda

Director de Área de Conocimiento de Agricultura, DACA

Universidad Nacional de Ingeniería

Su Despacho

Estimado Maestro Méndez.

He revisado el documento de Monografía titulado **Estudio de la Capacidad de Adsorción de Plomo, Cobre y Zinc en Semilla de *Moringa Oleífera***, realizado por las Bachilleres Yesenia Lucia Córdobas y Mariheylin Ruiz Sánchez, por lo que doy la autorización para que la Monografía sea defendida según lo establecido en la Normativa de Culminación de Estudios de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Sin más a que referirme, le saludo.

Atentamente,

MPhil. M.Sc. Lic. Martha Elizabeth Benavente Silva

Tutor

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a nuestro creador, por darnos la fuerza y esperanza durante todo el tiempo de realización de este trabajo, y así poder culminar este proyecto.

A nuestra tutora MPhil. Martha Benavente, por tanta, dedicación, conocimientos, consejos, orientación y esfuerzo hacia nosotras, para la realización de este proyecto. Que el señor la bendiga.

A las personas que siempre nos brindaron su apoyo y comprensión en los momentos que lo necesitábamos. Especialmente, al MSc. Ing. Juan Alonso por su apoyo en el análisis de las isotermas de adsorción.

Al responsable de laboratorio, Ing. Arnoldo Hidalgo, por el apoyo dentro de las instalaciones, durante la realización del trabajo monográfico.

Yesenia Lucia Córdoba y Mariheylin Ruiz Sánchez

DEDICATORIA

Dedico este proyecto primeramente a Dios por haberme concedido sabiduría, perseverancia, y bendiciones recibidas quien me hizo comprender que todo tiene su tiempo.

A mi madre Rita córdobas, quien es mi soporte en cada aspecto de mi vida por sus infinitos sacrificios, por su amor incondicional, apoyo, cariño y sobre todo por sus consejos.

A mi amiga y compañera de tesis, Mariheylin Ruiz Sánchez por su perseverancia, dedicación y esfuerzo en la realización de este trabajo.

A mi tutora Mphil. Martha Benavente, gracias por su gran apoyo, orientación y motivación en todos momentos durante el desarrollo de este trabajo.

Yesenia Lucia Córdoba

DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada a DIOS, ya que, gracias a Él, he logrado concluir mi carrera, a mis padres Ernesto Ruiz y Lucia Sanchez, porque siempre estuvieron a mi lado brindándome sus apoyos y sus consejos para hacer de mí una mejor persona. Y a mi esposo Samir Morales, porque siempre me motivo a seguir adelante con mi meta y sueño

A mi amiga Yesenia córdobas, por todos los buenos momentos que hemos compartido, en el momento de elaborar nuestra tesis, ya que esto nos permitió aprender tanto profesionalmente como personalmente.

Quiero de manera especial agradecer a mi tutora Martha Benavente, por confiar en mí, para realizar este proyecto, por haber sido muy paciente y haber sido esa persona que con sus directrices pudo explicarme aquellos detalles para culminar mi tesis.

Mariheylin Ruiz Sánchez

RESUMEN

El objetivo principal de esta tesis es evaluar la capacidad de adsorción de metales pesados (plomo, cobre y zinc) utilizando semillas trituradas de *Moringa oleífera* con bajo contenido de aceite. La investigación busca determinar las condiciones óptimas de pH y masa del adsorbente en un rango específico para maximizar la eficiencia en la remoción de estos iones metálicos.

La metodología incluyó la preparación de las semillas mediante extracción de aceite, lavado, secado y triturado, lo cual optimizó su capacidad de adsorción. Para el estudio, se llevaron a cabo experimentos de adsorción en lote (batch) con el fin de evaluar el efecto del pH y la masa del adsorbente en la eficiencia de remoción de los metales pesados. Adicionalmente, se aplicaron modelos de isoterma de adsorción (Langmuir, Freundlich, Sips y Redlich-Peterson) a los datos experimentales para caracterizar el comportamiento de adsorción de los iones metálicos sobre el bioadsorbente.

Los resultados demostraron que el pH es un factor crucial en el porcentaje de remoción de los tres metales, mostrando un aumento en la eficiencia de remoción al incrementar el pH de la solución. Asimismo, se observó que la eficiencia de remoción aumentó proporcionalmente con la masa del adsorbente, alcanzando eficiencias cercanas al 90% para los tres metales al utilizar una masa de 1.0 g. El ajuste de los modelos de isoterma mostró que el modelo de Langmuir describe adecuadamente la adsorción de cobre, sugiriendo una adsorción en monocapa; mientras que los modelos de Freundlich, Redlich-Peterson y Sips indicaron que la adsorción de zinc y plomo ocurre sobre superficies heterogéneas del adsorbente.

Estos hallazgos indican que las semillas de *Moringa oleífera* son una alternativa prometedora y viable para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, debido a su alta eficiencia de remoción y bajo costo. La investigación resalta la importancia de optimizar las condiciones de operación para potenciar la capacidad de adsorción de este biomaterial. Además, confirma que las semillas de *Moringa oleífera* con bajo contenido de aceite poseen una alta capacidad de adsorción para plomo, cobre y zinc y son eficaces en la remoción de estos metales en soluciones acuosas bajo condiciones controladas de pH y masa del adsorbente.

Este estudio proporciona una base sólida para el desarrollo de tecnologías sostenibles y económicas en el tratamiento de aguas residuales industriales, donde el uso de *Moringa oleífera* como adsorbente no solo es efectivo, sino también una opción ecológica y económica para la gestión de recursos hídricos.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA.....	ii
RESUMEN.....	iii
I. INTRODUCCION	1
II. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos Específicos	3
III. MARCO TEÓRICO	4
3.1 Generalidades de la <i>Moringa oleífera</i>	4
3.1.1 Origen	4
3.2 Características Agronómicas.....	4
3.3 Metales Pesados.....	5
3.4 Plomo	6
3.4.1 Generalidades.....	6
3.4.2 Usos del plomo	6
3.4.3 Efectos del plomo en la salud	8
3.4.4 Efectos ambientales del plomo	9
3.5 Zinc.....	10
3.5.1 Generalidades.....	10
3.5.2 Usos del Zinc	11
3.5.3 Efectos del zinc sobre el medioambiente	12
3.5.4 Efectos del zinc sobre la salud.....	12
3.6 Cobre.....	13
3.6.1 Generalidades.....	13
3.6.2 Usos del cobre	13
3.6.3 Efectos del cobre sobre el medioambiente	14
3.6.4 Efectos del cobre sobre la salud	15
3.7 Tipos de Adsorción.....	15
3.7.1 Adsorción por Intercambio	15

3.7.2	Adsorción por Fuerzas de Van Der Waals	16
3.7.3	Adsorción Química.....	16
3.7.4	Parámetros que influyen en el proceso de Adsorción	16
3.7.5	Tiempo de Equilibrio en la Adsorción.....	16
3.7.6	Masa de Adsorbente en la Adsorción	17
3.7.7	Isotermas de Adsorción	17
3.7.8	Isotermas de Freundlich.....	18
3.7.9	Isotermas de Langmuir	18
3.7.10	Modelo de Redlich-Peterson.....	19
3.7.11	Modelo Sips (Langmuir -Freundlich)	20
IV.	HIPOTESIS.....	21
4.1	Diseño experimental para el estudio efecto del pH y la masa de adsorbente	21
4.2	Diseño experimental para la evaluación de la isoterma de absorción del plomo, cobre y zinc con semilla triturada de <i>Moringa Oleífera</i>	21
V.	METODOLOGÍA.....	22
5.1	Materiales.....	22
5.1.1	Semillas de <i>Moringa oleífera</i>	22
5.1.2	Materiales, Cristalería y Equipos de laboratorio.....	22
5.2	Procedimiento	22
5.2.1	Preparación del Adsorbente.....	22
5.2.2	Efecto del pH en la remoción de plomo, cobre y zinc	23
5.2.3	Efecto de la masa de adsorbente en la remoción de plomo, cobre y zinc.	24
5.2.4	Estudio del Equilibrio de adsorción de plomo, cobre y zinc	24
5.3	Diseños Experimentales.....	24
5.3.1	Diseño experimental para el estudio efecto del pH y la masa de adsorbente.....	25
5.3.2	Diseño experimental para la evaluación de las isotermas de absorción del plomo, cobre y zinc con semilla triturada de <i>Moringa oleífera</i>	27
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
6.1	Preparación del Adsorbente con bajo contenido de aceite.....	28
6.2	Efecto del pH en la remoción de Cu, Zn y Pb.....	29
6.2.1	Efecto del pH en la remoción de Cu ²⁺	29

6.2.2	Efecto del pH en la remoción de Zn^{2+}	30
6.2.3	Efecto del pH en la remoción de Pb^{2+}	30
6.3	Efecto de la masa de adsorbente en la remoción de Cu, Zn y Pb.....	32
6.4	Equilibrio de Adsorción de Cobre, Zinc y Plomo	34
6.4.1	Isotermas de Adsorción de Cu^{2+}	34
6.4.2	Isotermas de Adsorción de Zn^{2+}	39
6.4.3	Isotermas de Adsorción de Pb^{2+}	42
6.4.4	Parámetros de los Modelos de las Isotermas de Adsorción de los iones Metálicos	47
VII.	CONCLUSIONES	48
VIII.	RECOMENDACIONES.....	49
IX.	REFERENCIAS BIBIOGRÁFICAS	50
X.	ANEXOS.....	54

I. INTRODUCCION

Las semillas de la *Moringa oleífera* son un floculante natural, poseen un alto contenido de proteínas catiónicas, las cuales son solubles en agua, con carga neta positiva y bajo peso. Actúan como los polímeros sintéticos utilizados industrialmente en el tratamiento de aguas. Este floculante actúa neutralizando y desestabilizando las cargas negativas de las partículas coloidales en suspensión, provocando que se agreguen entre sí y precipiten al fondo (Tenorio, Nuñez & Guzmán, 2008; Folkard & Sutherland, 1996).

Actualmente, el principal tratamiento químico utilizado para el agua con alta turbiedad es el coagulante sintético de sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) que representa altos costos para las plantas potabilizadoras urbanas y es inaccesible en sistemas rurales. El uso de sulfato de aluminio para el tratamiento del agua resulta en grandes cantidades de lodos producidos durante el tratamiento y un alto nivel de aluminio que permanece en el agua tratada (Moncada y Munguía, 2008). Esto puede presentar un problema de salud ya que se ha demostrado que la ingesta de grandes cantidades de sales de aluminio está relacionada con la enfermedad de Alzheimer (Özkahraman, 2017).

En Nicaragua, el agua sufre grandes contaminaciones que se originan de diversas fuentes, las más importantes son: suelos contaminados por fertilizantes químicos y plaguicidas empleados en la agricultura; lodos y aguas residuales industriales producto de la actividad minera; descomposición de la basura cercana a los cuerpos de agua (La Prensa, 2012). Aunado a esto, la alta actividad volcánica en el país permite la presencia común de metales pesados tales como el arsénico, en algunos mantos acuíferos y en los ríos, los cuales puede causar un efecto tóxico a quien la consume (Gómez, 2002).

Estudios anteriores han comprobado que la moringa es una alternativa viable como coagulante para el tratamiento de agua potable en países en vías de desarrollo (Muñoz et al., 2008). Una de las ventajas de la *Moringa oleífera* Lam. es, que no se necesita controlar el pH a diferencia de otros tratamientos como el caso del sulfato de aluminio, es resistente a diferentes pH y la temperatura; además, es de fácil acceso para familias que viven en zonas rurales pobres, ya que es un recurso disponible y puede ser plantado en varios lugares (Benettayeb, Usman, Tinashe, Adam & Haddou, 2022).

Aunque, en investigaciones anteriores se han utilizados la *Moringa oleífera* como bioadsorbente, muy pocas veces se han enfocados en el estudio de los mecanismos de adsorción para encontrar las características que posee las semillas relacionadas con la adsorción, no solo de metales pesados sino también

de halógenos presentes en las aguas. Benettayeb, Usman, Tinashe, Adam & Haddou (2022) proponen un mecanismo lógico que puede justificar la alta eficiencia de esta planta.

Esta tesis de investigación tiene como finalidad evaluar la efectividad de las semillas de *Moringa oleífera* como método para la remoción de plomo, cobre y zinc en agua para consumo humano, brindando alternativa, económicas y accesibles para descontaminar el agua a la cual tienen acceso los habitantes del sector rural de los municipios, que casi siempre están expuestos a un sinnúmero de enfermedades producidas en su gran mayoría por el consumo directo de aguas sin ningún tratamiento previo.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Determinar la capacidad de adsorción de plomo, cobre y zinc en semilla triturada de *Moringa oleífera* con bajo contenido de aceite, a través de la aplicación de los modelos de isotermas de adsorción.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar el efecto del pH y la masa de adsorbente en la remoción de los iones metálicos plomo, cobre y zinc, mediante un reactor batch con agitación.
- Evaluar las isotermas de adsorción del plomo, cobre y zinc a diferentes concentraciones del ion metálico, aplicando los modelos de Langmuir, Freundlich, Sips y Redlich-Peterson.

III. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta las generalidades de la planta *Moringa oleífera*, sus características, aplicaciones y su viabilidad como agente adsorbente con los metales plomo, cobre y zinc.

Así también, se incluye literatura relacionada al equilibrio y la cinética de adsorción para determinar la capacidad adsorbente de la semilla triturada de *Moringa oleífera* junto con los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos los cuales determinan la calidad de agua para su consumo.

3.1 Generalidades de la *Moringa oleífera*

3.1.1 Origen

Moringa oleífera es la especie más conocida del género *Moringa*. Es un árbol originario del sur del Himalaya, el noroeste de la India, Bangladesh, Afganistán y Pakistán. Se encuentra diseminado en una gran parte del planeta, la moringa es resistente a la sequía y tolera una precipitación anual de 500 a 1 500 mm. Además, crece en un rango de pH de suelo entre 4,5 y 8, excepto en arcillas pesadas, y prefiere suelos neutros o ligeramente ácidos.

En América Central, la *Moringa oleífera* fue introducida en los años 1920 como planta ornamental y para cercas vivas, se conoce además con otros nombres comunes, como palo jeringa, ben, acacia y jazmín francés. Es un árbol de hasta 9 m de altura. Las hojas son compuestas y están dispuestas en grupos de folíolos, con cinco pares de estos acomodados sobre el pecíolo principal y un folíolo en la parte terminal. Las hojas son alternas tripinnadas, con una longitud de 30-70 cm. (Ortega, 2014; Foidl, Mayorga & Vásquez, 1999)

3.2 Características Agronómicas

Se trata de un árbol perenne pero poco longevo, que a lo sumo puede vivir 20 años, aunque se han obtenido variedades en la India que son anuales. Es una especie de muy rápido crecimiento. Aporta una elevada cantidad de nutrientes al suelo, además de protegerlo de factores externos como la erosión, la desecación y las altas temperaturas (Morton, 1991); (Al, 1990).

En la Tabla 3.1 se muestran los datos de extracción de nutrientes en plantaciones de marango. La alta productividad implica una mayor extracción de nutrientes del suelo, por lo que en su cultivo intensivo debe ser considerada la fertilización (Foidl, Mayorga & Vásquez, 1999).

Tabla 3.1 Extracción de nutrientes con diferente productividad en *Moringa oleífera* (Biomasa seca/ha).

Extracción de nutrientes (Kg/ha/año)									
Productividad	Ca	P	Mg	K	Na	Cu	Zn	Mn	Fe
130	1 612	338	429	1 924	24.7	0.68	3.1	4.6	45.7
100	1 240	260	330	1 480	19.0	0.53	2.4	3.5	35.2
80	992	208	264	1 184	15.2	0.42	1.9	2.8	28.1
60	744	156	198	888	11.4	0.31	1.4	2.1	21.1
40	496	104	132	592	7.6	0.21	0.9	1.4	14.0
20	248	52	66	296	3.8	0.10	0.4	0.7	7.0

Fuente: Foidl, Mayorga & Vásquez, 1999.

3.2.1 Beneficios de la *Moringa oleífera*: Tratamiento del agua y floculante

La *Moringa oleífera* se ha introducción como un coagulante natural en los procesos de clarificación de agua para el consumo humano (Hernández, Cawich, Gómez & González, 2016; Araújo et al., 2010). Estos autores señalan los resultados alcanzados en laboratorio, al utilizar el cotiledón de las semillas de *Moringa oleífera* en la clarificación de agua para consumo humano. De las semillas se extrae un floculante natural tipo polielectrolito con función aniónica y catiónica, el cual sirve para la purificación de agua potable y para la sedimentación de partículas minerales orgánicas en aguas residuales. (Muñoz *et al.*, 2008)

3.3 Metales Pesados

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad alta. Son, en general, tóxicos para los seres humanos y entre los más susceptibles de presentarse en el agua se destacan mercurio, níquel, cobre, plomo y cromo (Facsa, 2022).

El incremento de concentración en las aguas de estos compuestos se debe principalmente a contaminación puntual de origen industrial o minero y la población en general. Los metales pesados son diariamente derramados sobre los recursos hídricos disponibles; entre estos metales están el plomo, el cobre y

el zinc. A continuación, se exponen las características, propiedades y efectos sobre la salud y el ambiente de estos metales.

3.4 Plomo

3.4.1 Generalidades

Elemento químico, Pb, número atómico 82 y peso atómico 207.19. El plomo es un metal pesado (densidad relativa, o gravedad específica, de 11.4 a 16°C (61°F)), de color azulado, que se empaña para adquirir un color gris mate. Es flexible, inelástico, se funde con facilidad, se funde a 327.4°C (621.3°F) y hierve a 1725°C (3164°F). Las valencias químicas normales son 2 y 4. En la Tabla 3.2 se presenta algunas de sus características químicas.

El plomo es relativamente resistente al ataque de los ácidos sulfúrico y clorhídrico. Pero se disuelve con lentitud en ácido nítrico. El plomo es anfótero, ya que forma sales de plomo de los ácidos, así como sales metálicas del ácido plúmbico. El plomo forma muchas sales, óxidos y compuestos organometálicos. (Lenntech, 2020a)

Industrialmente, sus compuestos más importantes son los óxidos de plomo y el tetraetilo de plomo. El plomo forma aleaciones con muchos metales y, en general, se emplea en esta forma en la mayor parte de sus aplicaciones. Todas las aleaciones formadas con estaño, cobre, cobalto y zinc, antimonio, bismuto, cadmio y sodio tienen importancia industrial.

3.4.2 Usos del plomo

El uso más amplio del plomo, como tal, se encuentra en la fabricación de acumuladores. Otras aplicaciones importantes son la fabricación de tetraetilplomo, forros para cables, elementos de construcción, pigmentos, soldadura suave y municiones. (Lenntech, 2020a)

Se están desarrollando compuestos organoplúmbicos para aplicaciones como son la de catalizadores en la fabricación de espuma de poliuretano, tóxicos para las pinturas navales con el fin de inhibir la incrustación en los cascos, agentes biocidas contra las bacterias grampositivas, protección de la madera contra el ataque de los barrenillos y hongos marinos, preservadores para el algodón contra la descomposición y el moho, agentes mosquicidas, agentes antihelmínticos, agentes reductores del desgaste en los lubricantes e inhibidores de la corrosión para el acero.

Además de su excelente resistencia a la corrosión, el plomo encuentra un amplio uso en la construcción, en particular en la industria química. Es resistente al ataque por parte de muchos ácidos, porque forma su propio revestimiento protector de óxido. Como consecuencia de esta característica ventajosa, el plomo se utiliza mucho en la fabricación y el manejo del ácido sulfúrico.

Durante mucho tiempo se ha empleado el plomo como pantalla protectora para las máquinas de rayos X. En virtud de las aplicaciones cada vez más amplias de la energía atómica, se han vuelto cada vez más importantes las aplicaciones del plomo como blindaje contra la radiación.

Su utilización como forro para cables de teléfono y de televisión sigue siendo una forma de empleo adecuada para el plomo. La ductilidad única del plomo lo hace particularmente apropiado para esta aplicación, porque puede estirarse para formar un forro continuo alrededor de los conductores internos.

El uso del plomo en pigmentos ha sido muy importante, pero está decreciendo en volumen. El pigmento que se utiliza más, en que interviene este elemento, es el blanco de plomo $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$; otros pigmentos importantes son el sulfato básico de plomo y los cromatos de plomo.

Se utilizan una gran variedad en compuestos de plomo, como los silicatos, los carbonatos y sales de ácidos orgánicos, como estabilizadores contra el calor y la luz para los plásticos de cloruro de polivinilo. Se usan silicatos de plomo para la fabricación de fritas de vidrio y de cerámica, las que resultan útiles para introducir plomo en los acabados del vidrio y de la cerámica. El azuro de plomo, $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$, es el detonador estándar para los explosivos. Los arsenatos de plomo se emplean en grandes cantidades como insecticidas para la protección de los cultivos. El litargirio (óxido de plomo) se emplea mucho para mejorar las propiedades magnéticas de los imanes de cerámica de ferrita de bario. En la Tabla 3.2 se muestran diferentes propiedades del plomo.

Tabla 3.2 Propiedades químicas del plomo.

Nombre	Plomo
Número atómico	82
Valencia	2.4
Estado de oxidación	2
Electronegatividad	1.9
Radio covalente (Å)	1.47
Radio iónico (Å)	1.20
Radio atómico (Å)	1.75
Configuración electrónica	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²
Primer potencial de ionización (eV)	7.46
Masa atómica (g/mol)	207.19
Densidad (g/ml)	11.4
Punto de ebullición (°C)	1,725
Punto de fusión (°C)	327.4

Fuente: *Lenntech, 2020a.*

3.4.3 Efectos del plomo en la salud

El plomo es un metal blando que ha sido conocido a través de los años por muchas aplicaciones. Este ha sido usado ampliamente desde el 5000 antes de Cristo para aplicaciones en productos metálicos, cables y tuberías, pero también en pinturas y pesticidas. El plomo es uno de los cuatro metales que tienen un mayor efecto dañino sobre la salud humana. Este puede entrar en el cuerpo humano a través de la comida (65%), agua (20%) y aire (15%) (Rica, 2007).

Las comidas como fruta, vegetales, carnes, granos, mariscos, refrescos y vino pueden contener cantidades significantes de Plomo. El humo de los cigarrillos también contiene pequeñas cantidades de plomo.

El plomo puede entrar en el agua potable a través de la corrosión de las tuberías. Esto es más común que ocurra cuando el agua es ligeramente ácida. Este es el porqué de los sistemas de tratamiento de aguas públicas son ahora requeridos llevar a cabo un ajuste de pH en agua que sirve para el uso del agua potable. Que nosotros sepamos, el Plomo no cumple ninguna función esencial en el cuerpo

humano, este puede principalmente hacer daño después de ser tomado en la comida, aire o agua.

El plomo puede causar varios efectos no deseados, como son:

- Perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia
- Incremento de la presión sanguínea
- Daño a los riñones
- Abortos y abortos sutiles
- Perturbación del sistema nervioso
- Daño al cerebro
- Disminución de la fertilidad del hombre a través del daño en el esperma
- Disminución de las habilidades de aprendizaje de los niños
- Perturbación en el comportamiento de los niños, como es agresión, comportamiento impulsivo e hipersensibilidad.
- Puede entrar en el feto a través de la placenta de la madre. Debido a esto puede causar serios daños al sistema nervioso y al cerebro de los niños por nacer.

3.4.4 Efectos ambientales del plomo

El plomo ocurre de forma natural en el ambiente, pero las mayores concentraciones que son encontradas en el ambiente son el resultado de las actividades humanas. (Lenntech, 2020a)

Debido a la aplicación del plomo en gasolinas un ciclo no natural del plomo tiene lugar. En los motores de los coches el plomo es quemado, eso genera sales de plomo (cloruros, bromuros, óxidos) se originarán. Estas sales de plomo entran en el ambiente a través de los tubos de escape de los coches. Las partículas grandes precipitarán en el suelo o la superficie de aguas, las pequeñas partículas viajarán largas distancias a través del aire y permanecerán en la atmósfera. Parte de este plomo caerá de nuevo sobre la tierra cuando llueva. Este ciclo del plomo causado por la producción humana está mucho más extendido que el ciclo natural del plomo. Este ha causado contaminación por plomo haciéndolo en un tema mundial

no sólo la gasolina con plomo causa concentración de plomo en el ambiente. Otras actividades humanas, como la combustión del petróleo, procesos industriales, combustión de residuos sólidos, también contribuyen.

El plomo puede terminar en el agua y suelos a través de la corrosión de las tuberías de Plomo en los sistemas de transportes y a través de la corrosión de pinturas que contienen Plomo. No puede ser roto, pero puede convertirse en otros compuestos.

El plomo se acumula en los cuerpos de los organismos acuáticos y organismos del suelo. Estos experimentarán efectos en su salud por envenenamiento por Plomo. Los efectos sobre la salud de los crustáceos pueden tener lugar incluso cuando sólo hay pequeñas concentraciones de este presente.

Las funciones en el fitoplancton pueden ser perturbados cuando interfiere con el plomo. El fitoplancton es una fuente importante de producción de oxígeno en mares y muchos grandes animales marinos lo comen. Este es por qué nosotros ahora empezamos a preguntarnos si la contaminación por plomo puede influir en los balances globales. Las funciones del suelo son perturbadas por la intervención del plomo, especialmente cerca de las autopistas y tierras de cultivos, donde concentraciones extremas pueden estar presente. Los organismos del suelo también sufren envenenamiento por plomo, es un elemento químico particularmente peligroso, y se puede acumular en organismos individuales, pero también entrar en las cadenas alimenticias.

3.5 Zinc

3.5.1 Generalidades

El zinc es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre. Este elemento se encuentra en el aire, el suelo y el agua, y está presente en todos los alimentos. En su forma pura elemental (o metálica), el zinc es un metal brillante de color blanco-azulado (ATSDR, 2016).

El zinc también puede combinarse con otros elementos; por ejemplo, cloro, oxígeno y azufre para formar compuestos de zinc. Los compuestos de zinc (que pueden encontrarse en sitios de desechos peligrosos) son el cloruro de zinc, óxido de zinc, sulfato de zinc y sulfuro de zinc. En la Tabla 3.3 se describen algunas de sus propiedades.

Tabla 3.3 Propiedades químicas del zinc.

Propiedades	Descripción
Número atómico	30
Valencia	2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1.6
Radio covalente (Å)	1.31
Radio iónico (Å)	0.74
Radio atómico (Å)	1.38
Configuración electrónica	[Ar]3d ¹⁰ 4s ²
Primer potencial de ionización (eV)	9.42
Masa atómica (g/mol)	65.37
Densidad (g/mL)	7.14
Punto de ebullición (°C)	906
Punto de fusión (°C)	419.5

Fuente: ATSDR, 2016.

3.5.2 Usos del Zinc

La mayor parte del mineral de zinc que se encuentra naturalmente en el ambiente está en la forma de sulfuro de zinc. Los compuestos de zinc son extensamente usados en la industria. El sulfuro de zinc y el óxido de zinc se usan para fabricar pintura blanca, cerámicas y otros productos. El óxido de zinc se usa también en la manufactura de caucho (ATSDR, 2016).

Los compuestos de zinc como el acetato de zinc, cloruro de zinc y sulfato de zinc se usan para preservar madera y en la manufactura de colorantes para telas. Los compuestos de zinc son usados por la industria farmacéutica como ingredientes en algunos productos comunes tales como, suplementos vitamínicos,

bloqueadores de sol, ungüentos para salpullidos causados por pañales, desodorantes, preparaciones para curar pie de atleta (ATSDR, 2016).

3.5.3 Efectos del zinc sobre el medioambiente

El zinc entra al aire, el agua y el suelo como resultado tanto de procesos naturales como actividades humanas. La mayor parte del zinc que entra al ambiente es el resultado de la minería, la refinación de minerales de zinc, plomo y cadmio, la producción de acero, la incineración de carbón y de desperdicios. Estas actividades pueden aumentar los niveles de zinc en la atmósfera (NTIS, 2016).

Industrias químicas que elaboran y manufacturan productos que contienen zinc, desagües domésticos y otras fuentes pueden descargar zinc a corrientes de agua directamente. El nivel de zinc en el suelo puede aumentar debido a estos factores, como también los abonos y lodos. En el aire el zinc se manifiesta como partículas finas de polvo que contiene zinc. Todo este polvo se deposita eventualmente sobre la tierra y fuentes de agua.

El zinc disuelto depositado en las fuentes de agua puede aumentar la acidez de la misma, los peces con tal razón, consumen este zinc de los alimentos que comen dentro del agua. Así estos se pueden intoxicar y afectar a los seres humanos al ser fuente de alimento, el zinc en cantidades apropiadas es nutritivo y esencial para todos los animales.

3.5.4 Efectos del zinc sobre la salud

Para proteger al público de los efectos perjudiciales de sustancias químicas tóxicas, y para encontrar maneras para tratar a personas que han sido afectadas, los científicos usan una variedad de pruebas. Las pruebas en animales son las más utilizadas ya que con estas pueden usarse para identificar cáncer o defectos de nacimiento.

Inhalar cantidades grandes de zinc, como el vapor en una soldadura, puede producir una enfermedad de corta duración llamada fiebre de vapores de metal que es generalmente reversible una vez pasa la exposición a esta. Sin embargo, no se conoce efectos a largo plazo por el respirar vapores de zinc.

Según el ATSDR (2016), la ingestión de demasiado zinc a través de los alimentos, el agua o suplementos dietéticos también puede afectar la salud. Los niveles de zinc que producen efectos adversos son mucho más altos que la ingesta diaria de zinc que se recomienda (RDA) de 11 mg/día para hombres y 8 mg/día para mujeres. La ingestión de dosis muy altas de zinc (10 a 15 veces más altas que la

RDA), aun durante un período breve, puede producir calambres estomacales, náusea y vómitos.

El consumo de muy poco zinc es un problema a la salud tan importante como el consumo de demasiado zinc. Sin el zinc necesario en la dieta, la gente puede experimentar pérdida del apetito, disminución del sentido del gusto y del olfato y de la función del sistema inmunitario, cicatrización lenta de las heridas y llagas en la piel (ATSDR, 2016).

3.6 Cobre

3.6.1 Generalidades

El estado del cobre en su forma natural es sólido (diamagnético). El cobre es un elemento químico de aspecto metálico, rojizo y pertenece al grupo de los metales de transición. Este es un excelente conductor de calor y electricidad (Lenntech BV, 2001).

El cobre generalmente se encuentra en la corteza terrestre como óxidos, sulfuros y rara vez en su estado metálico. Como consecuencia del contacto del agua con la corteza terrestre podemos encontrar sales de cobre disueltas en aguas superficiales y en los mantos subterráneos por la actividad industrial, usualmente en concentraciones menores a 20 µg/L (Carbotecnia, 2020). En la Tabla 3.4 se describen algunas propiedades químicas del cobre

3.6.2 Usos del cobre

La industria de la construcción es uno de los principales consumidores de cobre, utilizado para el cableado de edificaciones, tuberías de agua y de gas, sistemas térmicos, techumbres, terminaciones, o como componente estructural. El cobre es clave para la generación y distribución eléctrica ya que es un excelente conductor de esa energía (Codelco-Innovación, 2020).

Algunas propiedades del cobre, como el hecho de que sea un buen conductor térmico, fuerte, resistente a la corrosión y no magnético, determina su utilización en aleaciones destinadas a la construcción de maquinaria especializada y piezas destinadas a procesos industriales. El cobre también es utilizado en compuestos destinados a la agricultura; por ejemplo. Para compensar la deficiencia de este elemento vital en los suelos o en los cultivos (Codelco-Innovación, 2020).

Tabla 3.4 Propiedades químicas del cobre.

Propiedades	Descripción
Número atómico	29
Valencia	1.2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1.9
Radio covalente (Å)	1.38
Radio iónico (Å)	0.69
Radio atómico (Å)	1.28
Configuración electrónica	[Ar]3d ¹⁰ 4s ¹ p
Primer potencial de ionización (eV)	7.77
Masa atómica (g/mol)	63.54
Densidad (g/mL)	8.96
Punto de ebullición (°C)	2,595
Punto de fusión (°C)	1,083

Fuente: Lenntech, 2020b.

3.6.3 Efectos del cobre sobre el medioambiente

La producción mundial de cobre está todavía creciendo. Esto básicamente significa que más y más cobre termina en el medioambiente. Los ríos están depositando barro en sus orillas que están contaminados con cobre, debido al vertido de aguas residuales contaminadas con cobre.

El cobre puede ser liberado en el medioambiente tanto por actividades humanas como por procesos naturales. Ejemplo de fuentes naturales son las tormentas de polvo, descomposición de la vegetación e incendios forestales. Otros ejemplos

son la minería, la producción de metal, la producción de madera y la producción de fertilizantes fosfatados (Lenntech, 2020b).

El cobre no se rompe en el ambiente y por eso se puede acumular en plantas y animales cuando este se encuentra en el suelo. En suelos ricos de cobre solo un pequeño número de plantas puede vivir, por esa razón no hay establecidas fábricas de cobre, ya que sería una amenaza para la producción en las granjas.

El cobre puede interrumpir la actividad agrícola o natural en el suelo, su influencia negativa en la actividad de microorganismos y lombrices de tierra, lo cual hace que la descomposición de la materia orgánica disminuya.

3.6.4 Efectos del cobre sobre la salud

El cobre no se considera un veneno acumulativo sistémico. Dosis orales de hasta 100 mg causan síntomas de gastroenteritis y náuseas. Solo las personas con enfermedad de Wilson tienen el riesgo de los efectos tóxicos de este elemento debido a un desorden en su metabolismo que no les permite sintetizarlo (Carbotecnia, 2020).

El cobre se considera un elemento esencial en la nutrición humana, debido a que interviene en muchas reacciones enzimáticas. Los científicos recomiendan un consumo de 2 mg/día, esta dosis se puede obtener en alimentos como crustáceos, leguminosas, nueces y cacao.

3.7 Tipos de Adsorción

La adsorción es la adhesión de átomos, iones o moléculas de un gas, líquido o sólido disuelto a una superficie. Este proceso crea una película de adsorbato en la superficie del adsorbente (Brownfields-Glossary, 2008).

Dependiendo de qué tipos de fuerzas existan entre el soluto y el adsorbente, se pueden diferenciar tres tipos de adsorción: adsorción por intercambio, Adsorción por Fuerzas de Van Der Waals Adsorción Química (González, 2010).

3.7.1 Adsorción por Intercambio

En este proceso el soluto y el adsorbente se atraen por fuerzas electrostáticas. Los iones del soluto se concentran en la superficie del adsorbente, que se halla cargada eléctricamente con signo contrario a los iones del soluto.

Si tenemos dos adsorbatos iónicos iguales en varios factores, pero uno con mayor carga que otro, el de mayor carga será adsorbido. Para adsorbatos con igual carga, el tamaño molecular es el que determina cuál será adsorbido.

3.7.2 Adsorción por Fuerzas de Van Der Waals

También llamada adsorción física o fisorción. En este tipo de adsorción, el adsorbato no está fijo en la superficie del adsorbente, sino que tiene movilidad en la internase. Ejemplo de este tipo de adsorción es el de la mayoría de las sustancias orgánicas en agua con carbón activado. En este tipo, el adsorbato conserva su naturaleza química.

3.7.3 Adsorción Química

La adsorción de una especie química presente en la solución (adsorbato) por los constituyentes de la fase sólida del adsorbente ocurre debido a las interacciones entre la superficie activa de las partículas sólidas y el adsorbato. La cantidad adsorbida de una determinada especie depende no solo de la composición sino también de la especie química de la que se trata y de su concentración en la solución.

3.7.4 Parámetros que influyen en el proceso de Adsorción

El valor del pH de la fase acuosa es el factor más importante tanto en la adsorción de cationes como de aniones, siendo el efecto distinto en ambos casos. Así, mientras que la adsorción de cationes suele estar favorecida para valores de pH superiores a 4,5, la adsorción de aniones prefiere un valor bajo de pH, entre 1,5 y 4 (Kuyucak y Volesky, 2008; citado en Garces Jaraba y Coavas Romero, 2012).

3.7.5 Tiempo de Equilibrio en la Adsorción

Generalmente, la adsorción del metal pesado ha sido evaluada mediante la utilización de isothermas que describen el equilibrio del proceso. Los modelos de Langmuir y Freundlich han sido posiblemente los más utilizados para describir con éxito el equilibrio de adsorción; aunque ambos modelos son empíricos, las constantes del modelo de Langmuir son más fácilmente interpretables.

Para la adsorción de metales pesados, la retención aumenta inicialmente de una manera lineal con la concentración en el equilibrio; esta retención está limitada por el número de sitios activos y, por tanto, llega a alcanzarse una meseta, que no es más que aquel tiempo a partir del cual el adsorbente, por más que se mantenga en contacto con la solución, ya no produce más adsorción (Volesky B. 1990 citado en Garces Jaraba y Coavas Romero, 2012).

3.7.6 Masa de Adsorbente en la Adsorción

La cantidad de adsorbente es el factor que va a limitar hasta cierto punto la concentración de metal que se adsorbe, es decir a mayor cantidad de adsorbente, se obtiene una mayor adsorción, pero lo ideal es llegar a una relación de equilibrio, entre la cantidad de adsorbente y la concentración de metal, para un óptimo resultado de adsorción (Garces Jaraba y Coavas Romero, 2012).

3.7.7 Isotermas de Adsorción

La isoterma de adsorción es la relación de dependencia, a una temperatura constante de la cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente con respecto a la concentración del adsorbato en equilibrio (Álvarez Barrantes, 2007).

Duarte & Rodríguez (1999) reporta que la adsorción es favorable, aun en soluciones diluidas, cuando cualquier isoterma de adsorción, es cóncava hacia las abscisas; de forma contraria, se dice que la adsorción es desfavorable cuando la isoterma es cóncava hacia el eje de las ordenadas.

Los modelos de adsorción clásicos como Langmuir y Freundlich son los más utilizados para describir el equilibrio entre los iones del metal adsorbidos en la biomasa (q_{eq}) y la concentración del metal remanente en la solución (C_{eq}) a una temperatura constante (Duarte, Olivero & Jaramillo, 2009).

Las isotermas se obtendrán relacionando la capacidad de adsorción del adsorbente (q_{eq}) y la concentración final del ion metálico en el equilibrio (C_{eq}). La capacidad de adsorción se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$q_e = \frac{(C_o - C_{eq})V}{m} \quad \text{Ec.1}$$

Donde q_e es la capacidad de adsorción del adsorbente (mg/g), C_o es la concentración inicial del metal en la solución (mg/l), C_{eq} es la concentración final del metal en el equilibrio (mg/l), V es el volumen de las soluciones de ión metálico (L) y m es la masa del adsorbente utilizado en cada experimento (g).

Las isotermas son parte esencial para modelar la adsorción y por lo tanto para el diseño, cálculo de eficiencias y costos de la adsorción. Además, permiten estimar el grado de purificación que puede ser alcanzado, la cantidad de adsorbente requerido, y la sensibilidad del proceso respecto a la concentración del producto (Tejada, Villabona & Garcés, 2014).

3.7.8 Isotermas de Freundlich

Es una isoterma de adsorción, que consiste en una curva que relaciona la concentración de un soluto en la superficie de un adsorbente, con la concentración del soluto en el líquido con el que está en contacto.

La ecuación de Freundlich considera que los sitios activos del adsorbente no son iguales y, además, asume la adsorción multicapa; es decir, que una vez cubierta la superficie del adsorbente, otras moléculas del adsorbato pueden ser acomodados sobre una segunda superficie.

La isoterma de Freundlich se describe por medio de una ecuación exponencial empírica de la forma (Gerente, Lee, Cloirec & MacKay, 2007):

$$q_e = a_F C_{eq}^{b_F} \quad \text{Ec.2}$$

Donde q_e es la capacidad de adsorción de adsorbato por unidad de peso del adsorbente (mg soluto/g_{sólido}); C_{eq} es la concentración de equilibrio del adsorbato correspondiente a q_e ; (mg/l); a_F es una constante del sistema adsorbato – adsorbente y b_F es un parámetro empírico que usualmente tiene valores menores que la unidad.

La linealización de la ecuación Ec.2 se lleva a cabo en su forma logarítmica:

$$\log q_e = \log a_F + b_F \log C_{eq} \quad \text{Ec.3}$$

Los valores numéricos de a_F y b_F pueden ser encontrados del intercepto y la pendiente de la recta.

3.7.9 Isotermas de Langmuir

La isoterma de Langmuir (1918) es el primer modelo teórico más sencillo para la adsorción de gases en sólidos. Este modelo se basa en la suposición de que la superficie del adsorbente está cubierta con un gran número de sitios o posiciones, en cada una de las cuales pueden asentarse una molécula adsorbida (Gerente, Lee, Cloirec & MacKay, 2007). Así también, considera que las posiciones son todas equivalentes y que no hay interacción entre las moléculas adsorbidas.

Con los datos de la capacidad de adsorción q_e (mg/g), la capacidad máxima adsorbida por el adsorbente, $q_{e, max}$ (mg/g), la constante de ligamiento b (g/L) y la concentración final del metal en el equilibrio C_{eq} (mg/L), se obtiene el modelo de la isoterma de Langmuir mediante la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{q_{e,max} b C_{eq}}{1 + b C_{eq}} \quad \text{Ec.4}$$

Siendo su forma linealizada:

$$\frac{C_{eq}}{q_e} = \frac{1}{q_{e,max}} C_{eq} + \frac{1}{q_{e,max} b} \quad \text{Ec.5}$$

Para obtener estas isotermas se grafican los datos de la concentración final del metal en el equilibrio (C_{eq})/la capacidad de adsorción de la semilla triturada de moringa (q_{eq}) en función de los datos de la concentración del metal en el equilibrio (C_{eq}).

Los valores numéricos de la capacidad máxima de adsorción del metal respecto al adsorbente, $q_{e,max}$ (mg/g) y la constante de ligamiento b (L/mg) son obtenidos de la pendiente y la intersección de la forma lineal de la isoterma de Langmuir.

3.7.10 Modelo de Redlich-Peterson

Este modelo combina elementos de Langmuir y Freundlich por lo que el mecanismo de absorción es un híbrido, usando tres parámetros, que no sigue el postulado ideal de absorción por monocapas. Dicho modelo es ampliamente usado y visto como un intermedio entre el sistema ampliamente usado y visto como un intermedio entre el sistema tipo Freundlich y el sistema tipo Langmuir. (Pérez, González & Delgado, 2011)

La ecuación del modelo de la Isoterma de Redlich-Peterson (Gerente, Lee, Cloirec & MacKay, 2007) es:

$$q_e = \frac{K_R C_{eq}}{1 + a_R C_{eq}^{b_R}} \quad \text{Ec.6}$$

Donde K_R es la constante de Redlich-Peterson, a_R es el parámetro de Redlich-Peterson y b_R es el factor exponencial de Redlich-Peterson el cual varía entre 0 y 1 y determina el grado de heterogeneidad de la superficie siendo más homogéneo al acercarse a 1. De esta manera, el factor exponencial b_R puede caracterizar una isoterma: si b_R es cercano a 1, la isoterma preferida sería la de Langmuir, mientras que, si b_R es cercano a 0, la isoterma se aproxima a la de Freundlich (Obregón Valencia, 2012).

3.7.11 Modelo Sips (Langmuir -Freundlich)

Fue propuesta por Robert Sips en 1948, es una combinación de isothermas de Langmuir y Freundlich, este modelo al igual que el de Freundlich no se resuelve a la ley de Henry para límite de presión cero, la ecuación del modelo es (Do, 1998):

$$q_e = \frac{q_{max} (k_s C_{eq})^{\frac{1}{b_s}}}{1 + (k_s C_{eq})^{\frac{1}{b_s}}} \quad \text{Ec.7}$$

Donde k_s y b_s son constantes empíricas y parámetros de la isoterma, el parámetro $b_s = 1/n$ varía con el grado de heterogeneidad de la superficie del adsorbente. Cuando n es mayor que 1 se establece el fenómeno de cooperación positiva entre el adsorbente y el adsorbato mientras que para un valor menor que 1 esta cooperación positiva no existe.

IV. HIPOTESIS

Para este estudio se consideran dos hipótesis (la hipótesis Nula y la Hipótesis Alternativa). Para cada diseño experimental propuesto, los cuales se describen a continuación.

4.1 Diseño experimental para el estudio efecto del pH y la masa de adsorbente

Hipótesis Nula: El pH de la solución acuosa y la masa de adsorbente no tiene efecto en la remoción de plomo, cobre y zinc, en el rango establecido para cada variable.

Hipótesis Alternativa: Al menos un valor de pH inicial de la solución acuosa y/o la masa de adsorbente tiene efecto en la remoción del plomo, cobre y zinc, en el rango establecido para cada variable.

4.2 Diseño experimental para la evaluación de la isoterma de absorción del plomo, cobre y zinc con semilla triturada de *Moringa Oleífera*

Hipótesis Nula: Los datos experimentales no influyen en el ajuste de los modelos propuestos de las isotermas de absorción de plomo, cobre y zinc en la semilla triturada de *Moringa Oleífera*, al pH de trabajo y masa de adsorbente utilizado.

Hipótesis Alternativa: Los datos experimentales influyen en el ajuste de los modelos propuestos de las isotermas de absorción de plomo, cobre y zinc en la semilla triturada de *Moringa Oleífera*, al pH de trabajo y masa de adsorbente utilizado.

V. METODOLOGÍA

En este capítulo se establecen los materiales, equipos y procedimientos que se utilizaron en la parte experimental para el estudio de la capacidad de adsorción del plomo, cobre y zinc en semilla de *Moringa oleífera* con bajo contenido de aceite. Así también, el estudio para comprobar el efecto del pH y la masa absorbente en la remoción de estos iones metálicos.

5.1 Materiales

5.1.1 Semillas de *Moringa oleífera*

Las semillas de *Moringa oleífera* que se utilizó en las pruebas experimentales como agente adsorbente se recolectó en el municipio de La Paz Centro del Departamento de León, teniendo las siguientes georreferencias: 12°19'27.44" N y 86°37'17.11" O y una elevación de 70 msnm.

5.1.2 Materiales, Cristalería y Equipos de laboratorio

En las Tablas A.1.1 y A.1.2 del Anexo A.1 se enlistan los materiales, cristalería y equipos de laboratorio que se utilizaron para llevar a cabo las pruebas experimentales.

5.2 Procedimiento

5.2.1 Preparación del Adsorbente

- **Selección y descascarado:** Se pesaron y se descascararon aquellas semillas que tenían una buena apariencia, y se descartaron las semillas con un color oscuro. Posteriormente, se pesaron, por separado, las semillas peladas y la cáscara (Figura A.3.1).
- **Lavado y Secado de la semilla:** En un beaker se agregó 250 ml de agua destilada y 1 g de cloruro de sodio. Se calentó esta solución en una plancha de calentamiento a una temperatura de 130°C por 20 minutos (Figura A.3.2a). Luego, se agregó la mezcla en caliente a las semillas, previamente colocadas en otro recipiente, y se dejó reposar por un tiempo de 2 minutos. Posteriormente, se descartó la solución líquida y las semillas se secaron en un horno (BARNSTEID-THERMOLYNE) a una temperatura de 115°C, durante un tiempo de 15 minutos (Figura A.3.2b).
- **Triturado:** las semillas peladas y secas se trituraron, primero, en un Procesador de alimentos (Marca Premier) y posteriormente, usando un

mortero hasta obtener un tamaño de partícula de aproximadamente de 1 a 3 cm (Figura A.3.3).

- **Extracción de aceite:** las semillas trituradas se colocaron en una evaporadora y se le agregó agua destilada hasta cubrir completamente las semillas (Figura A.3.4a). Se calentó la mezcla en una plancha de calentamiento a 130°C por una hora (Figura A.3.4b). Subsiguientemente, se separó el aceite de las semillas trituradas mediante el uso de un colador (Figura A.3.4c).
- **Secado:** las semillas trituradas de *M. Oleífera* se secaron en un horno (BARNSTEID-THERMOLYNE) a 115°C por un tiempo de 15 minutos para reducir la humedad. Este tiempo se obtuvo mediante pruebas preliminares en el laboratorio.
- **Triturado y Tamizaje de las semillas de *Moringa oleífera*:** se trituraron nuevamente las semillas de moringa peladas y se tamizaron en un tamiz de < 0.45 mm. Por último, se pesaron.
- **Triturado y Tamizaje de la cáscara:** la cáscara también se trituró en un procesador de alimentos hasta un tamaño menor de un 1 cm y se tamizó en un tamiz de < 0.45 mm. Por último, se pesó el material.

5.2.2 Efecto del pH en la remoción de plomo, cobre y zinc

Para el estudio del efecto del pH inicial en el porcentaje de remoción de cada uno de los iones metálicos (Pb^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+}), se llevaron a cabo experimentos a diferentes valores iniciales de pH en un intervalo de 5 a 7.2. En el caso del cobre, no se realizaron las pruebas experimentales a pH de 7 y 8 debido a que a esos pH se produce la formación de hidróxido de cobre II, $Cu(OH)_2$, el cual precipita.

El pH inicial de soluciones de 50 mg/l de los iones metálicos se reguló por la adición de soluciones de ácido clorhídrico (HCl) de 0.01 y 1.0 N o hidróxido de sodio (NaOH) 0.3 – 3%, utilizando un pH-metro. Para los experimentos, 50 ml de cada una de las soluciones preparadas, a diferentes pH, se puso en contacto con 0.5 g del adsorbente y la mezcla se agitó en un agitador magnético a temperatura ambiente durante 2 horas, a una velocidad de agitación de 350 rpm. Finalmente, la mezcla se filtró y se determinó la concentración del ion metálico por Espectrometría de Absorción Atómica. El Porcentaje de Remoción del ion metálico en función del pH fue calculado utilizando la siguiente ecuación:

$$\%Remoción = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad Ec.8$$

5.2.3 Efecto de la masa de adsorbente en la remoción de plomo, cobre y zinc.

Para este estudio, se llevaron a cabo experimentos utilizando diferentes masas de adsorbente: 0.2, 0.5, y 1.0 g. Para ello, 50 ml de cada una de las soluciones preparadas de los iones metálicos (Pb^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+}) de 50 mg/L, al pH de máxima adsorción, se puso en contacto con la masa de adsorbente.

La mezcla se agitó en un agitador magnético a temperatura ambiente durante 1 hora, a una velocidad de agitación de 350 rpm. Finalmente, la mezcla se filtró y se determinó la concentración del ion metálico por Espectrofotometría de absorción atómica. El Porcentaje de Remoción del ion metálico en función de la masa de adsorbente fue calculado utilizando la Ecuación 8.

5.2.4 Estudio del Equilibrio de adsorción de plomo, cobre y zinc

La determinación de las isothermas de adsorción se llevó a cabo al pH óptimo establecido en el acápite 5.2.2. La variable que se evaluó fue la concentración de los iones metálicos: 2, 5, 10, 50, 100, 200, 300 y 500 mg/L; manteniendo constantes los siguientes parámetros: temperatura ($25 \pm 2^\circ\text{C}$), tamaño de partícula ($<0.45\text{mm}$), tiempo de agitación (3 h), velocidad de agitación (350 rpm), masa de adsorbente y pH óptimo.

Para los experimentos, 50 ml de cada una de las soluciones preparadas se puso en contacto con 0.5 g del adsorbente y la mezcla se agitó en un agitador magnético a temperatura ambiente durante 3 horas. Al finalizar la agitación, para cada uno de los casos, la mezcla se filtró y se determinó la concentración del ion metálico por Espectrofotometría de absorción atómica.

A partir de los datos experimentales se determinó la capacidad de adsorción mediante la Ecuación 1 (ítem 5.5) para cada uno de los iones metálicos. Posteriormente, se evaluó las isothermas de adsorción del plomo, cobre y zinc en semilla triturada de *Moringa oleífera* a diferentes concentraciones del ion metálico, aplicando los modelos de Freundlich (Ecuación 3), Langmuir (Ecuación 5), Redlich-Peterson (Ecuación 6) y Sips (Ecuación 7) presentados en el ítem 3.5.

5.3 Diseños Experimentales

Para este trabajo monográfico se consideraron dos diseños experimentales: uno para el estudio del efecto del pH y la masa de adsorbente en la remoción de los iones metálicos plomo, cobre y zinc; y el segundo para la evaluación de las isothermas de adsorción del plomo, cobre y zinc a diferentes concentraciones del

ion metálico usando los modelos de Langmuir, Freundlich, Sips y Redlich-Peterson.

5.3.1 Diseño experimental para el estudio efecto del pH y la masa de adsorbente

5.3.1.1 Diseño de Experimentos

Para la realización del diseño experimental se usó el software STATGRAPHICS Centurion XVI. Para las pruebas experimentales se consideraron los siguientes factores: el pH inicial de la solución, la masa de adsorbente, el tipo de ion metálico y la concentración del ion metálico como variables controladas. Mientras que el porcentaje de remoción y la capacidad de adsorción (q_e) del ion metálico fueron las variables dependientes. Para todos los casos, los experimentos se realizaron por duplicado.

5.3.1.2 Determinación del pH de máxima adsorción para plomo, cobre y zinc

El pH óptimo es aquel donde se presenta la mayor adsorción del ion metálico en el adsorbente en un rango de pH establecido. Es un parámetro importante ya que el pH afecta la adsorción de metales pesados. El efecto del pH en la adsorción de los iones metálicos Pb^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} fue estudiado en un rango de 5 a 8. En la Tabla 5.1 se describen los parámetros considerados.

Tabla 5.1 Descripción de los parámetros establecidos para la determinación del pH de máxima adsorción.

Parámetro	Descripción	Unidades
pH	5, 6, 7 y 8	N/A
Masa Bioadsorbente	0.5	g
Concentración inicial	50	mg/L
Tiempo de agitación	2	h
Temperatura	25 ± 2	$^{\circ}C$
Velocidad de agitación	350	rpm

Fuente: adaptada.

5.3.1.3 Diseño factorial categórico de múltiples niveles:

Factores o variables independiente: 2 (pH y Tipo de ion metálico)

Réplicas: 2 Número de niveles: 4 y 3

Corridas base: 12 Total de corridas: 24

5.3.1.4 Determinación del efecto de la masa de adsorbente en la remoción de plomo, cobre y zinc

El efecto de la masa de adsorbente en la adsorción de los iones metálicos Pb^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} se estudió en un rango de 0.2 a 1.0 g. En la Tabla 5.2 se describen los parámetros considerados.

Tabla 5.2 Descripción de los parámetros establecidos para la determinación del efecto de la masa de adsorbente en la remoción de los iones metálicos.

Parámetro	Descripción	Unidades
pH	Óptimo de adsorción (en el rango de 5 a 8)	N/A
Masa adsorbente	0.2, 0.5 y 1.0	g
Concentración inicial	50	mg/L
Tiempo de agitación	2	h
Temperatura	25 ± 2	°C
Velocidad de agitación	350	rpm

Fuente: adaptada.

5.3.1.5 Diseño factorial categórico de múltiples niveles:

- Factores o variables independiente: 2 (masa de adsorbente y Tipo de ion metálico)
- Número de niveles: 3 y 3
- Réplicas: 2
- Corridas base: 9
- Corridas totales: 18

5.3.2 Diseño experimental para la evaluación de las isothermas de absorción del plomo, cobre y zinc con semilla triturada de *Moringa oleífera*

5.3.2.1 Determinación de Isothermas del plomo, cobre y zinc

La determinación de las isothermas de adsorción se llevó a cabo al pH óptimo establecido en el acápite 5.3.1. Las variables a evaluar fueron la concentración del ion metálico (5, 10, 50, 100, 150, 300 y 500 mg/L) y el tipo de ion metálico (Pb^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+}). En la Tabla 5.3 se describen los parámetros considerados.

Tabla 5.3 Descripción de los parámetros establecidos para la determinación del efecto de la masa de adsorbente en la remoción de los iones metálicos.

Parámetro	Descripción	Unidades
pH	Óptimo de adsorción (en el intervalo de 5 a 8)	N/A
Masa adsorbente	Óptimo de adsorción (en el rango de 0.2 a 1.0)	g
Concentración inicial	5,10, 50, 100, 200, 300 y 500	mg/L
Tiempo de agitación	3	h
Temperatura	25 ± 2	°C
Velocidad de agitación	350	rpm

Fuente: adaptada.

5.3.2.2 Diseño factorial categórico de múltiples niveles:

- Factores o variables independiente: 2 (Concentración inicial y Tipo de ion metálico)
- Número de niveles: 7 y 3
- Réplicas: 2
- Corridas base: 9
- Corridas totales: 18

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los principales resultados del estudio de la capacidad de adsorción del cobre, zinc y plomo en semilla de *Moringa oleífera*. Esto incluye, los resultados sobre la determinación del efecto del pH y la masa de adsorbente en la remoción de estos iones metálicos. Los datos obtenidos del estudio de las isotermas de adsorción fueron evaluados aplicando los modelos de Freundlich, Langmuir, Redlich-Peterson y Sips.

6.1 Preparación del Adsorbente con bajo contenido de aceite

La preparación de la semilla de *Moringa oleífera* (M.O) con bajo contenido de aceite involucró diferentes etapas: selección y lavado del material, descascarado de la semilla, primera trituración, extracción del aceite, secado y segunda trituración del producto.

De acuerdo a los resultados, se obtuvo un %Rendimiento final del 45.62% de semillas de M.O procesadas y con poco contenido de aceite. En la Tabla 6.1 se muestra el Porcentaje de Rendimiento en cada una de las etapas principales del proceso.

Tabla 6.1 Porcentaje de Rendimiento en cada una de las etapas de proceso para la obtención del adsorbente.

Descripción	Masa (g)	Porcentaje de Rendimiento (%) con respecto al peso inicial de la semilla
Peso inicial de la semilla con cáscara	250.00	–
Peso de la semilla sin cáscara	114.04	45.62
Peso de la cáscara	135.50	54.20
Peso de la semilla sin cáscara después del lavado con NaCl (1 g/L), filtrado y secado	105.93	42.37
Peso de la semilla seca, triturada y sin aceite	44.80	17.92

Fuente: Elaboración propia.

6.2 Efecto del pH en la remoción de Cu, Zn y Pb

Para el estudio del efecto del pH inicial en el porcentaje de remoción de cada uno de los iones metálicos (Pb^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+}) usando semilla triturada de M.O como adsorbente, se llevaron a cabo experimentos a diferentes valores iniciales de pH.

6.2.1 Efecto del pH en la remoción de Cu^{2+}

Los resultados experimentales obtenidos para la determinación del pH óptimo de adsorción del cobre utilizando semilla de *Moringa oleífera* en un intervalo de pH de 5.0 a 6.3 se muestran en la Figura 6.1. No se realizaron experimentos a pH 7 y 8 debido a la formación de un precipitado azul de hidróxido de cobre, $\text{Cu}(\text{OH})_2$, que podría interferir en la evaluación de la adsorción.

Los datos indican que el pH inicial de la solución afecta significativamente el porcentaje de remoción de cobre. A medida que el pH aumenta, también lo hace el porcentaje de remoción, alcanzando el valor máximo de 97.65% a un pH de 6.3. Dentro del rango de pH evaluado, se logró un alto porcentaje de remoción de cobre, con valores que oscilaron entre el 82.5% y el 97.8%.

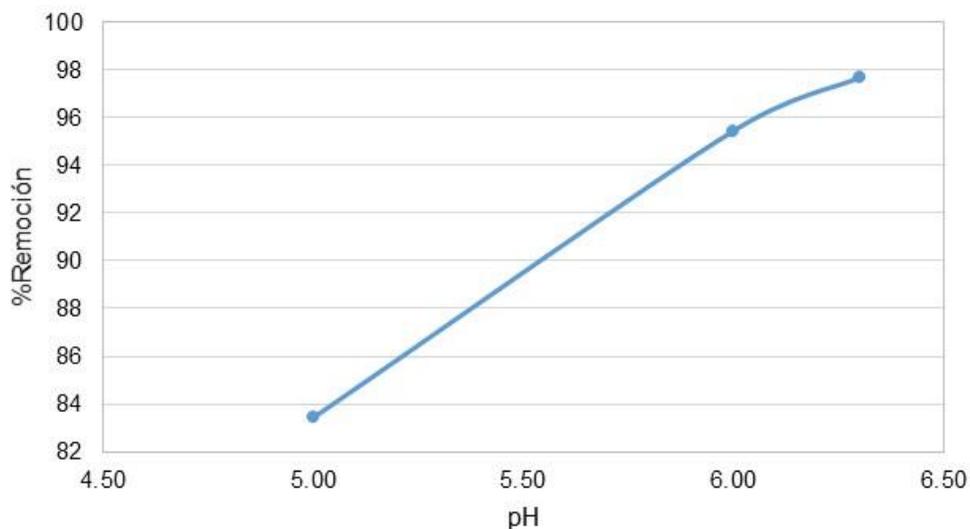


Figura 6.1 Porcentaje de remoción de Cu^{2+} en semilla de M.O en función del pH de la solución.

6.2.2 Efecto del pH en la remoción de Zn²⁺

En la Figura 6.2 se presentan los resultados correspondientes al pH óptimo de adsorción de zinc, utilizando semilla de *Moringa oleífera* con bajo contenido de aceite como adsorbente. Se trabajó en un intervalo de pH de 5 a 7, empleando una concentración inicial de zinc de 50 mg/L y un tiempo de agitación de una hora.

Los resultados muestran que, en el rango de pH estudiado, se obtuvo un buen porcentaje de remoción de zinc, entre 88.4% y 95.4%. Al igual que con el cobre, el porcentaje de remoción de zinc aumentó conforme lo hizo el pH, alcanzando su valor máximo a pH 7, con una remoción del 95.4%.

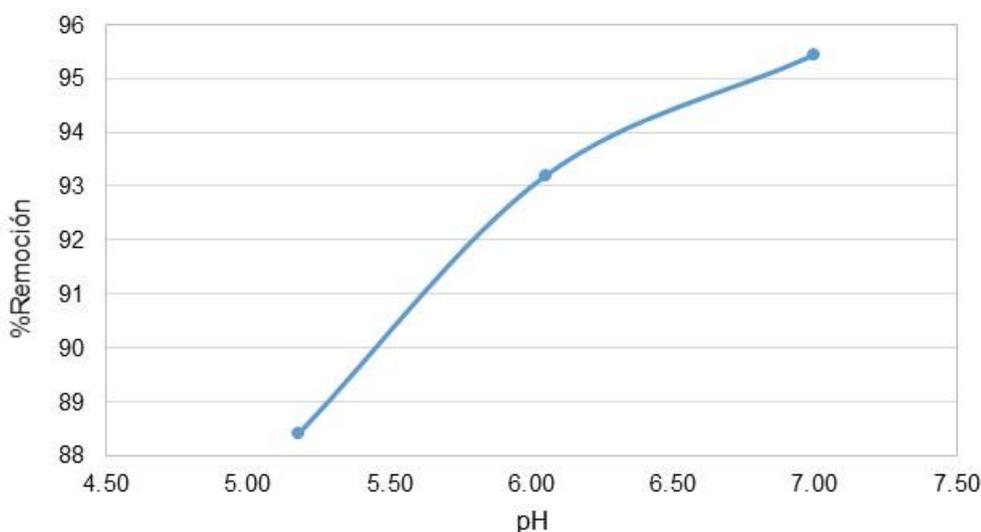


Figura 6.2 Porcentaje de remoción de Zn²⁺ en función del pH de la solución.

6.2.3 Efecto del pH en la remoción de Pb²⁺

Los resultados del estudio del efecto del pH en la remoción de plomo, utilizando semilla de *Moringa oleífera* en un intervalo de pH de 5.3 a 7.2, se muestran en la Figura 6.3. No se realizaron experimentos a pH 8 debido a la completa hidrólisis del plomo, que resultó en la formación de un precipitado blanco de Pb(OH)₂.

Los resultados indican que el pH inicial influye en la remoción de plomo, mostrando un incremento en el porcentaje de remoción conforme aumenta el pH. En el rango de pH evaluado, los porcentajes de remoción oscilaron entre 82.1% y 92.7%, con el valor máximo alcanzado a pH 7.

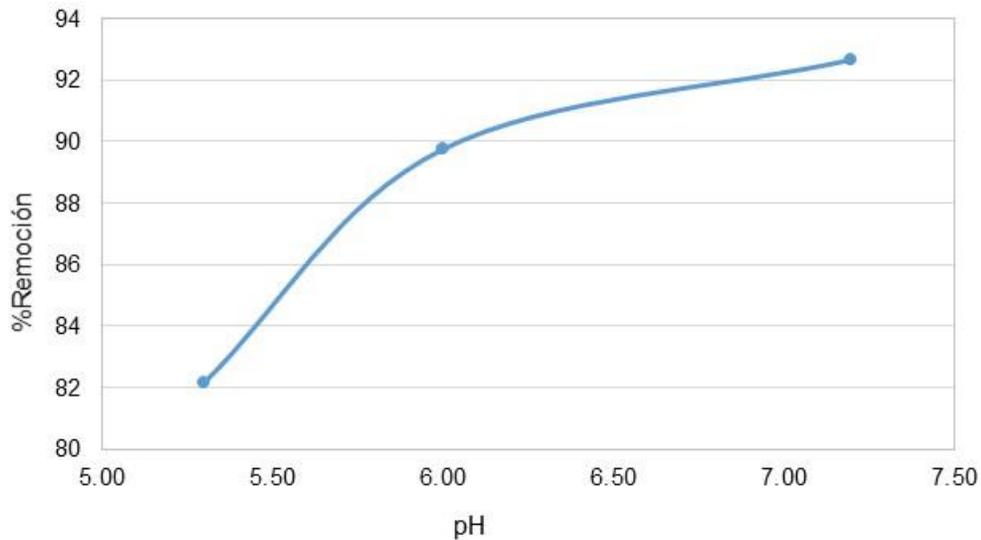


Figura 6.3 Porcentaje de remoción de Pb^{2+} en función del pH de la solución.

En el rango de pH estudiados para la remoción de los iones cobre (Cu^{2+}), zinc (Zn^{2+}) y plomo (Pb^{2+}), se observó que, a medida que el pH de la solución aumentaba, también lo hacía el porcentaje de remoción. Este comportamiento está en concordancia con lo reportado en estudios previos.

Según Rivera & Martínez Bobadilla (2020), la semilla de *Moringa Oleífera* contiene grupos funcionales polares: hidroxilos ($-OH$), carboxilos ($-COOH$) y aminos ($-NH_2$), los cuales, a bajo pH, tienden a protonarse, es decir, captan iones H^+ del medio acuoso. Esta protonación genera una repulsión electrostática entre los grupos funcionales de la *Moringa* y los iones metálicos, los cuales también están cargados positivamente, lo que limita la capacidad del adsorbente para atraer y retener dichos iones. Sin embargo, a medida que el pH aumenta, la concentración de iones H^+ en el medio disminuye, lo que permite que los grupos funcionales se desprotonen y queden libres para interactuar con los iones metálicos. Como resultado, el porcentaje de remoción de los metales pesados incrementa.

Estos hallazgos están en concordancia con la Hipótesis alternativa planteada, ya que confirma la influencia significativa del pH en capacidad de adsorción de los iones metálicos por parte de la semilla de *Moringa Oleífera*.

Los resultados del porcentaje de remoción de cobre, plomo y zinc a diferentes pH se muestran en la Tabla 6.2. Estos resultados respaldan la importancia de ajustar el pH en procesos de tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, optimizando las condiciones para obtener una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes.

Tabla 6.2 Resultados de porcentajes de remoción de los iones metálicos a diferentes pH.

Cobre		Zinc		Plomo	
pH	%Remoción promedio	pH	%Remoción promedio	pH	%Remoción promedio
5.00	83.42	5.18	88.4	5.30	82.1
6.00	95.43	6.05	93.2	6.00	89.7
6.30	97.65	7.00	95.4	7.20	92.7

Fuente: Elaboración propia.

6.3 Efecto de la masa de adsorbente en la remoción de Cu, Zn y Pb

Para estudiar el efecto de la cantidad de adsorbente en la remoción de los iones de cobre, plomo y zinc, se emplearon diferentes masas de semilla triturada de *Moringa oleífera* con bajo contenido de aceite como adsorbente, específicamente 0.2, 0.5 y 1.0 g. Las condiciones experimentales se mantuvieron constantes en todos los casos: un pH de 6.0 ± 0.3 , una temperatura ambiente de laboratorio (25°C), un tiempo de agitación de 1 hora y una velocidad de agitación de 350 rpm. Los resultados del porcentaje de remoción de cobre, plomo y zinc a diferentes cantidades de adsorbente se muestran en la Tabla 6.3.

En la Figura 6.4 se observa los resultados del efecto de la masa de adsorbente sobre la remoción de los diferentes iones metálicos. Los datos muestran una tendencia clara: a medida que aumenta la masa de adsorbente, se incrementa el porcentaje de remoción de los iones metálicos. Este comportamiento se explica porque, al aumentar la masa de adsorbente, también se incrementa la disponibilidad de los sitios activos o grupos funcionales, tales como hidroxilos ($-\text{OH}$), carboxilos ($-\text{COOH}$) y aminos ($-\text{NH}_2$), en la superficie del adsorbente. Estos sitios son los responsables de interactuar con los iones metálicos, facilitando la adsorción y, por lo tanto, aumentando el porcentaje de remoción.

En el caso del ion cobre, los porcentajes de remoción obtenidos con masas de 0.2, 0.5 y 1.0 g de *Moringa oleífera*, fueron de 53.25, 79.83% y 87.16%, respectivamente. Estos resultados indican que, al aumentar la cantidad de adsorbente, el porcentaje de remoción de cobre mejora considerablemente. Un comportamiento similar se observó para los iones zinc, con porcentajes de remoción que oscilan entre 74.56 (para 0.2 g) y 96.25% (para 1.0 g). En el caso

del plomo, los porcentajes de remoción variaron entre 80.28 a 93.34%, mostrando también una tendencia creciente con el aumento de la masa del adsorbente. Estos hallazgos están en concordancia con la Hipótesis alternativa planteada, ya que confirma el efecto significativo de la masa en la capacidad de adsorción de los iones metálicos por parte de la semilla de *Moringa oleífera*.

El incremento en la remoción de los metales pesados al aumentar la masa del adsorbente es un fenómeno esperado, dado que más masa implica una mayor superficie de contacto y una mayor cantidad de grupos funcionales disponibles para la adsorción. Sin embargo, es importante notar que el incremento en la eficiencia de remoción tiende a estabilizarse a partir de cierta masa, como se observa en el caso del cobre (87.16% con 1.0 g), lo que sugiere que a partir de esa masa no se producen mejoras significativas en la remoción. Esto puede ser debido a la saturación de los sitios activos del adsorbente o a limitaciones en la transferencia de masa en la solución.

Este análisis confirma la alta capacidad de la semilla de *Moringa oleífera* como adsorbente natural para la remoción de metales pesados, y refuerza la idea de que la dosificación del adsorbente es un factor clave en la optimización de los procesos de tratamiento de aguas contaminadas.

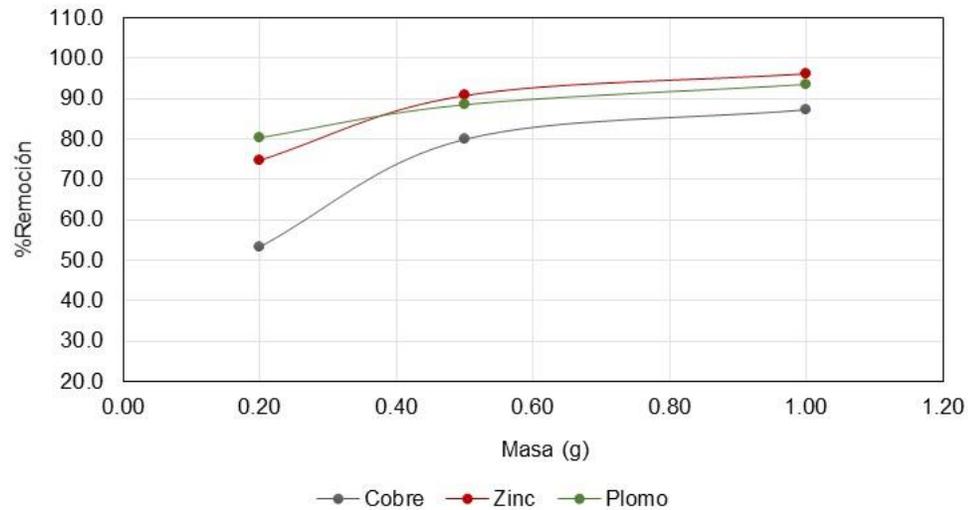


Figura 6.4 Efecto de la masa de adsorbente en la remoción de Cu^{2+} , Zn^{2+} y Pb^{2+} .

Tabla 6.3 Resultados de porcentajes de remoción de los iones metálicos a diferentes cantidades de adsorbente.

Masa (g)	%Remoción	%Remoción	%Remoción
	Cobre	Zinc	Plomo
0.20	53.25	74.56	80.28
0.50	79.83	90.77	88.36
1.00	87.16	96.25	93.34

Fuente: Elaboración propia.

6.4 Equilibrio de Adsorción de Cobre, Zinc y Plomo

Para el estudio del equilibrio de adsorción de cobre, plomo y zinc en semilla de *Moringa Oleífera* se evaluaron concentraciones de iones metálicos de 2, 5, 10, 50, 100, 200, 300 y 500 ppm, utilizando una masa de adsorbente de 0.50 g y un volumen de solución de 0.05 L.

Los datos experimentales fueron evaluados con los modelos de isoterma de Freundlich (Ecuación 3), Langmuir (Ecuación 5), Redlich-Peterson (Ecuación 6) y Sips (Ecuación 7), con el fin de determinar cuál de estos modelos se ajusta mejor a los resultados experimentales. Para la validación de los ajustes se empleó el coeficiente de determinación (R^2).

6.4.1 Isotermas de Adsorción de Cu^{2+}

Los experimentos de equilibrio de adsorción de cobre (Cu) en semillas de *Moringa oleífera* (M.O.) se realizaron a un pH de 5.5, seleccionado porque a valores de pH más altos, la solución que contenía el ion cobre presentaba turbidez y un color celeste, lo cual indicaba la formación de hidróxido de cobre debido a la hidrolización del ion metálico. Los datos experimentales obtenidos se encuentran en la Tabla A.3.3 del Anexo A.3.

En la Figura 6.5 se presenta la isoterma de adsorción de cobre, donde se graficaron los datos experimentales de la capacidad de adsorción (q_e), expresada en mg/g, en función de la concentración de cobre en equilibrio (C_{eq}), en mg/L.

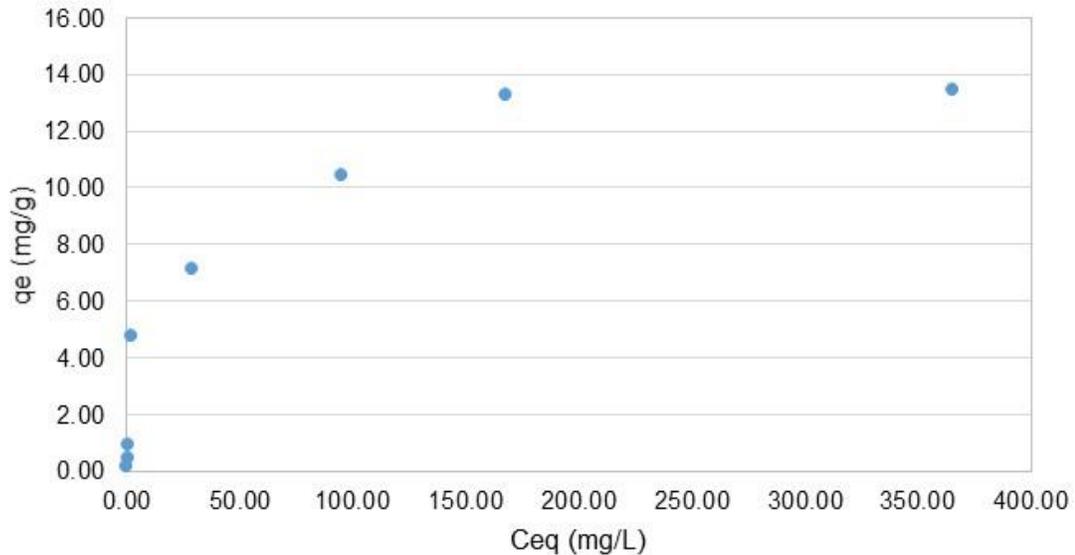


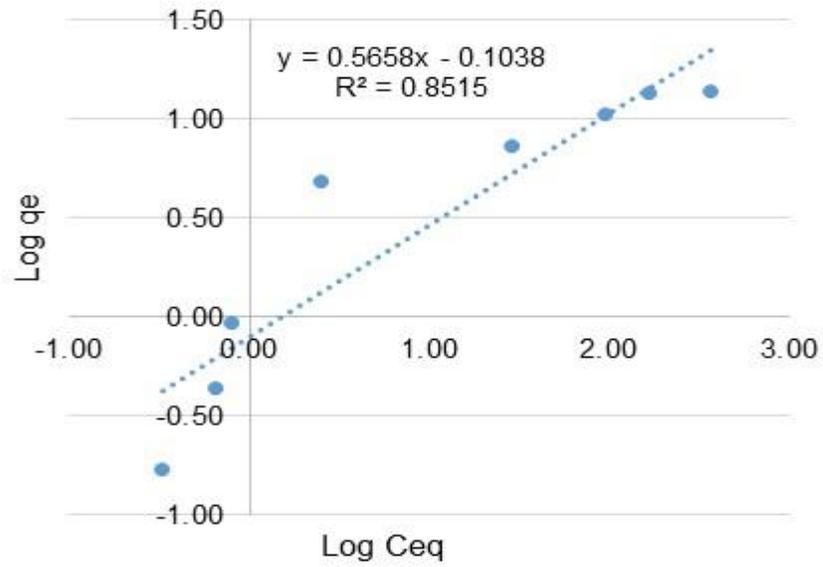
Figura 6.5 Isotherma de adsorción de cobre en semilla de *Moringa oleifera*.

Para el ajuste de los datos experimentales al modelo de Freundlich (Ecuación 3), se graficó el Log q_e en función del Log C_{eq} , mientras que para el modelo de Langmuir (Ecuación 5), se representó C_{eq}/q_e en función de C_{eq} . Ambos gráficos fueron obtenidos utilizando la herramienta Excel, y se presentan en la Figura 6.6.

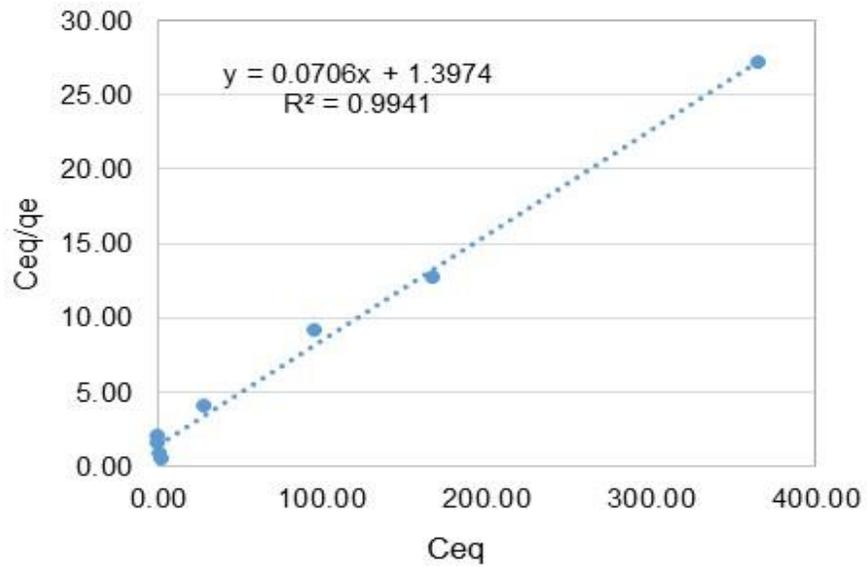
La gráfica del modelo de Freundlich (Figura 6.6.a) mostró un coeficiente de determinación (R^2) de 0.8515, indicando un ajuste moderado a los datos experimentales. En cambio, la gráfica correspondiente al modelo de Langmuir (Figura 6.6.b) presentó un R^2 de 0.9941, lo que sugiere un ajuste casi perfecto a este modelo.

Los resultados indican que el modelo de Langmuir describe mejor el proceso de adsorción del ion cobre en el adsorbente, sugiriendo la existencia de una adsorción en monocapa en sitios específicos del material. Este comportamiento es coherente con el modelo de Langmuir, que asume que la adsorción ocurre en sitios homogéneos y que no hay interacciones entre las moléculas adsorbidas, lo que contrasta con el modelo de Freundlich, que describe una adsorción en superficies heterogéneas y con la formación de multicapas (Orihuela, 2015).

El hecho de que los datos se ajusten mejor al modelo de Langmuir sugiere que la superficie de la semilla de *Moringa oleifera* presenta una mayor homogeneidad en sus sitios activos.



(a) Modelo de Freundlich



(b) Modelo de Langmuir

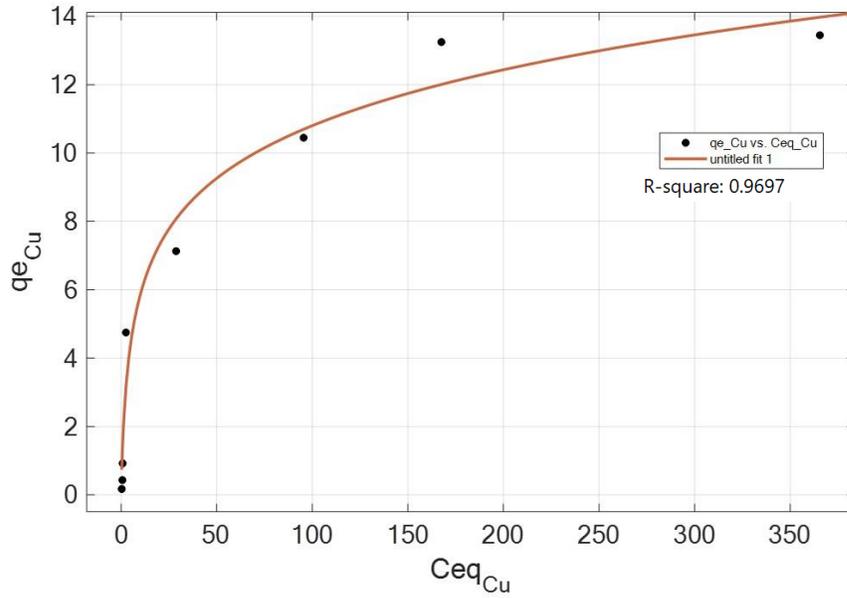
Figura 6.6 Ajuste de los datos experimentales del equilibrio de adsorción de cobre a los modelos de Freundlich y Langmuir.

Para ajustar los datos experimentales a los modelos de Redlich-Peterson (Ecuación 6) y Sips (Ecuación 7), se utilizó la herramienta Curve Fitting Toolbox de Matlab. La Figura 6.7 muestra las gráficas de la capacidad de adsorción (q_e), en función de la concentración de cobre en equilibrio (C_{eq}), junto con los ajustes correspondientes a los modelos mencionados.

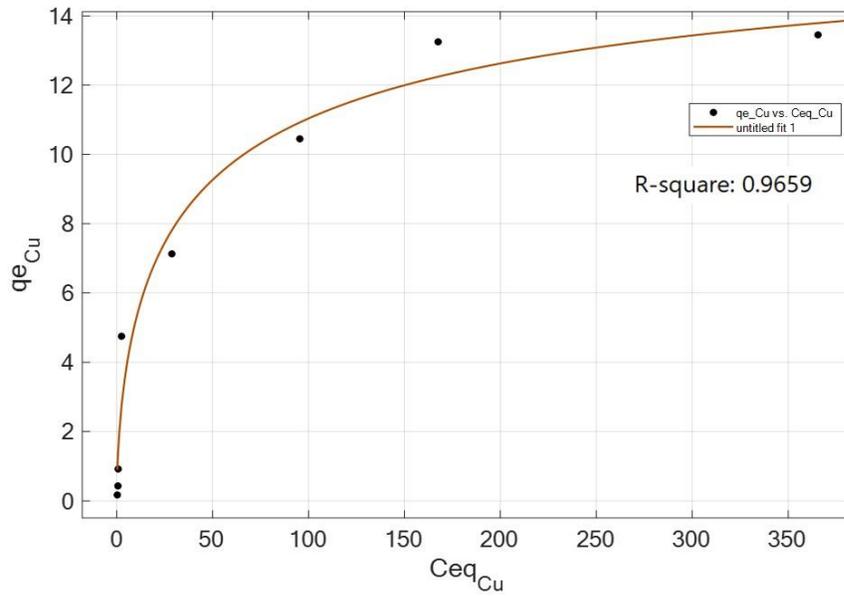
Los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos para los modelos de Redlich-Peterson y Sips fueron bastante similares, con valores de 0.9697 y 0.9659, respectivamente, lo que indica un ajuste moderadamente bueno a los datos experimentales. Sin embargo, al comparar estos resultados con el modelo de Langmuir, que presentó un R^2 de 0.9941, se observa que este último proporciona el mejor ajuste. Esto sugiere que la adsorción del ion cobre en la semilla de *Moringa oleífera* ocurre mayormente en sitios homogéneos, sin interacciones significativas entre las moléculas adsorbidas, lo que concuerda con el supuesto del modelo de Langmuir.

Los modelos de Redlich-Peterson y Sips son combinaciones de características de los modelos de Freundlich y Langmuir. El hecho de que estos modelos también se ajusten relativamente bien a los datos sugiere que la adsorción puede tener características tanto de adsorción en superficies heterogéneas como homogéneas, aunque con una mayor tendencia hacia la homogeneidad (dado el mejor ajuste del modelo de Langmuir). En el caso del modelo de Sips, se toma en cuenta la heterogeneidad de la superficie del adsorbente, lo que podría ser una explicación para los ligeros desajustes observados en comparación con el modelo de Langmuir.

Aunque los modelos de Redlich-Peterson y Sips no muestran un ajuste tan fuerte como el de Langmuir, su capacidad para describir la adsorción sugiere que, bajo ciertas condiciones, podría haber sitios activos con diferentes energías de adsorción. No obstante, en este caso, la adsorción parece ser predominantemente homogénea, como lo refleja el excelente ajuste del modelo de Langmuir.



(a) Modelo de Redlich-Peterson.



(b) Modelo de Sips.

Figura 6.7 Ajuste de los datos experimentales del equilibrio de adsorción de cobre a los modelos de Redlich-Peterson y Sips.

6.4.2 Isotermas de Adsorción de Zn²⁺

Los experimentos de equilibrio de adsorción de zinc (Zn) en semillas de *Moringa oleífera* (M.O.) se realizaron a un pH de 6.0. Los datos experimentales obtenidos se presentan en la Tabla A.3.4 del Anexo A.3. En la Figura 6.8 se muestra la isoterma de adsorción de zinc, donde se graficó la capacidad de adsorción (q_e), expresada en mg/g, en función de la concentración de zinc en equilibrio (C_{eq}), en mg/L.

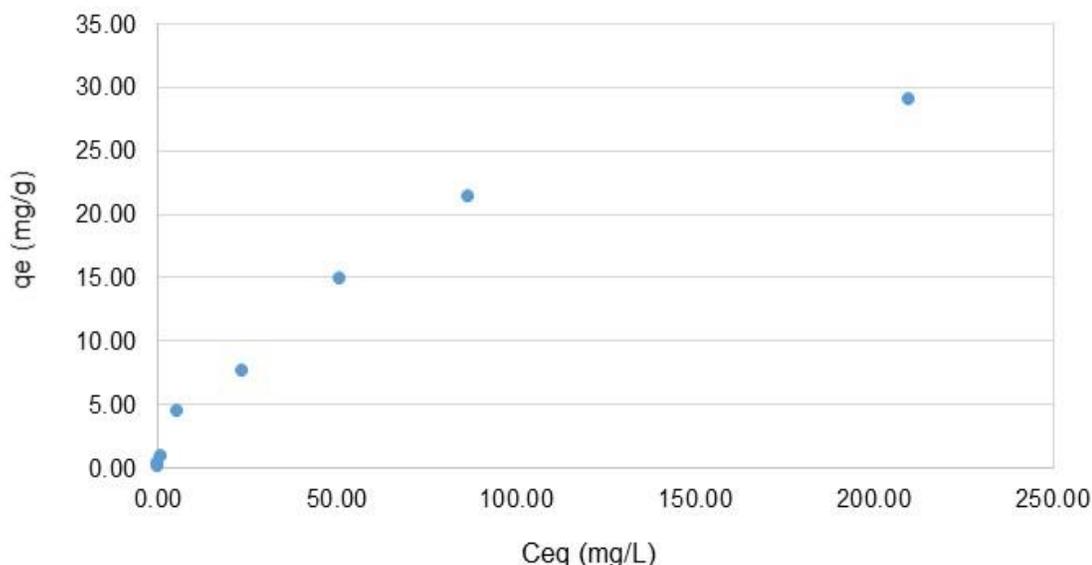
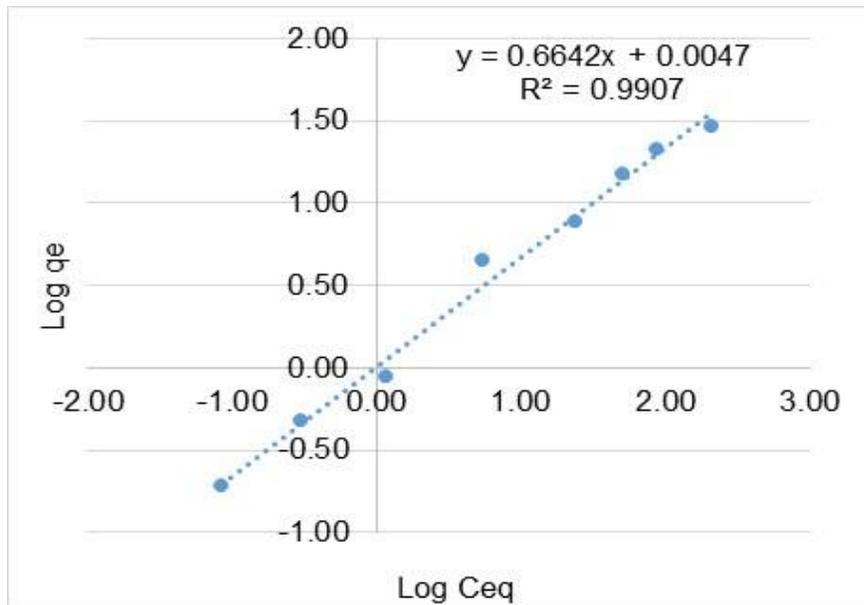


Figura 6.8 Isoterma de adsorción de zinc en semilla de *Moringa Oleífera*.

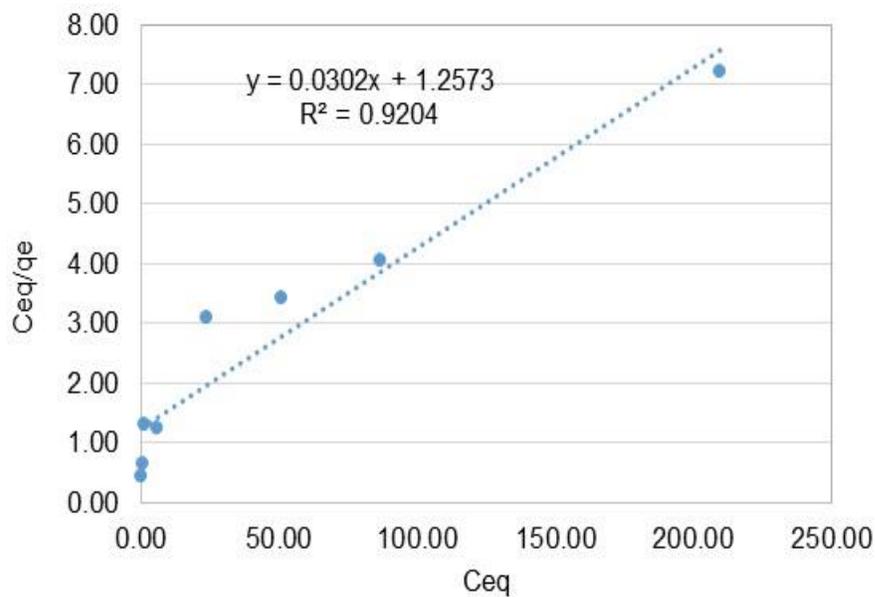
La gráfica del modelo de Freundlich (Figura 6.9.a) mostró un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9907, lo que indica un buen ajuste a este modelo. En cambio, la gráfica correspondiente al modelo de Langmuir (Figura 6.9.b) presentó un R^2 de 0.9204, lo que refleja un ajuste moderado a los datos experimentales. Este comportamiento es diferente al observado para los iones de cobre, donde los datos experimentales se ajustaron mejor al modelo de Langmuir.

Los resultados del equilibrio de adsorción de zinc sugieren que el modelo de Freundlich describe con mayor precisión el proceso de adsorción del ion zinc en la semilla de M.O., lo que indica una adsorción sobre superficies heterogéneas y la posible formación de multicapas (Orihuela, 2015).

El hecho de que el modelo de Langmuir no ajuste bien a los datos experimentales sugiere que la adsorción de zinc no sigue un mecanismo simple de monocapa. Este resultado es coherente con la naturaleza del adsorbente, que tiene una superficie diversa con distintos tipos de sitios activos.



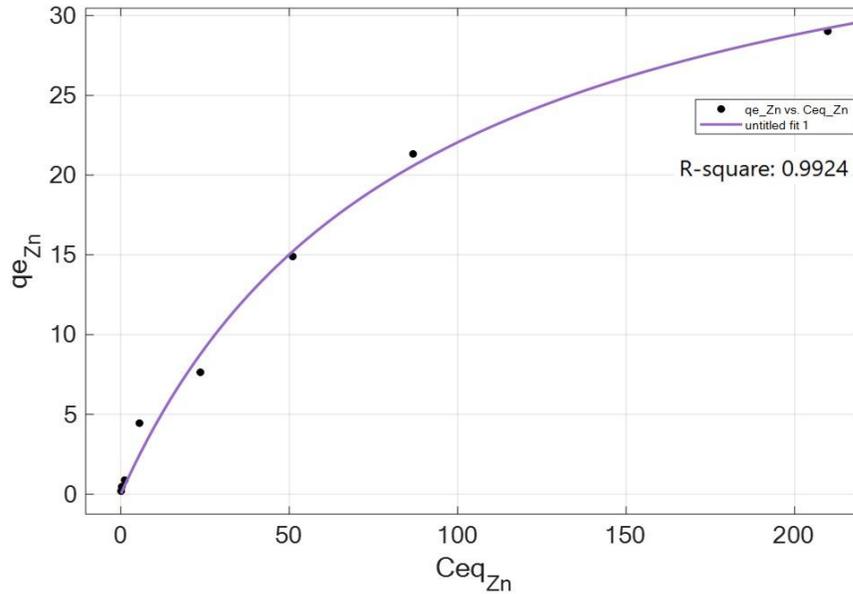
(a) Modelo de Freundlich.



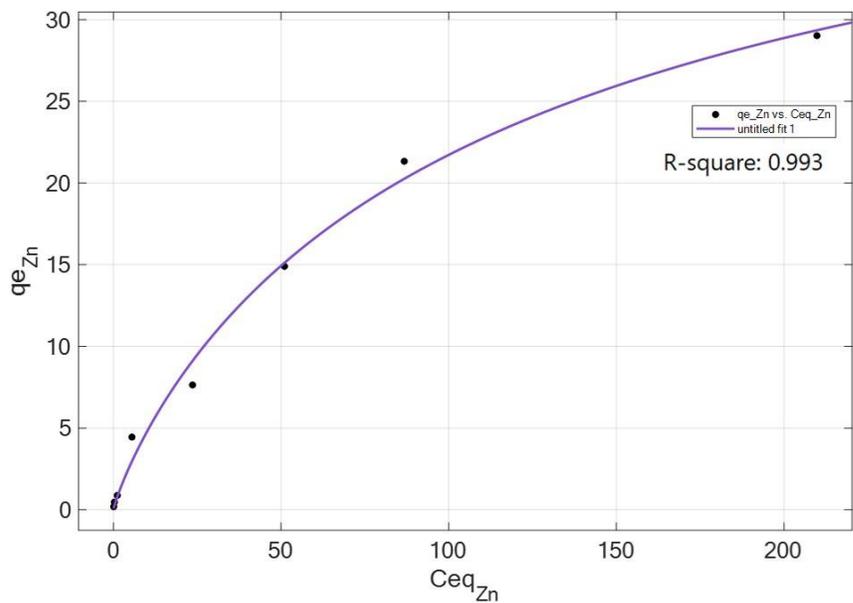
(b) Modelo de Langmuir.

Figura 6.9 Ajuste de los datos experimentales del equilibrio de adsorción de zinc a los modelos de Freundlich y Langmuir.

La Figura 6.10 muestra las gráficas de la capacidad de adsorción (q_e) en función de la concentración de zinc en equilibrio (C_{eq}), junto con los ajustes correspondientes a estos modelos.



(a) Modelo de Redlich-Peterson.



(b) Modelo de Sips.

Figura 6.10 Ajuste de los datos experimentales del equilibrio de adsorción de zinc a los modelos de Redlich-Peterson y Sips.

Al igual que con el cobre, los datos experimentales de la adsorción de zinc se ajustaron también a los modelos de Redlich-Peterson y Sips, utilizando la herramienta Curve Fitting Toolbox de Matlab. Los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos para los modelos de Redlich-Peterson y Sips fueron similares, con

valores de 0.9924 y 0.993, respectivamente, lo que indica un ajuste muy bueno a los datos experimentales. A pesar de que el modelo de Freundlich también presentó un buen ajuste (R^2 de 0.9907), los modelos de Redlich-Peterson y Sips proporcionan un ajuste ligeramente superior.

Como se mencionó previamente, los modelos de Redlich-Peterson y Sips combinan características de los modelos de Freundlich y Langmuir. El hecho de que estos modelos muestren un mejor ajuste a los datos sugiere que el proceso de adsorción podría tener características tanto de superficies heterogéneas como homogéneas, con una mayor tendencia hacia la heterogeneidad, dado el mejor ajuste al modelo de Freundlich. Asimismo, estos modelos permiten suponer que, bajo ciertas condiciones, existen sitios activos con diferentes energías de adsorción, lo que podría explicar la variabilidad en la capacidad de adsorción observada.

6.4.3 Isotermas de Adsorción de Pb^{2+}

Los experimentos de equilibrio de adsorción de plomo (Pb^{2+}) en semillas de *Moringa oleífera* se realizaron a un pH de 5.0. Este valor de pH fue seleccionado debido a que, a valores más altos, la solución que contenía el ion plomo presentaba un color blanquecino y un precipitado blanco, lo que indicaba la formación de hidróxido de plomo como resultado de la hidrólisis del ion metálico. Los datos experimentales obtenidos se presentan en la Tabla A.3.5 del Anexo A.3. En la Figura 6.11 se muestra la isoterma de adsorción de plomo, donde se graficó la capacidad de adsorción (q_e), expresada en mg/g, en función de la concentración de plomo en equilibrio (C_{eq}), en mg/L.

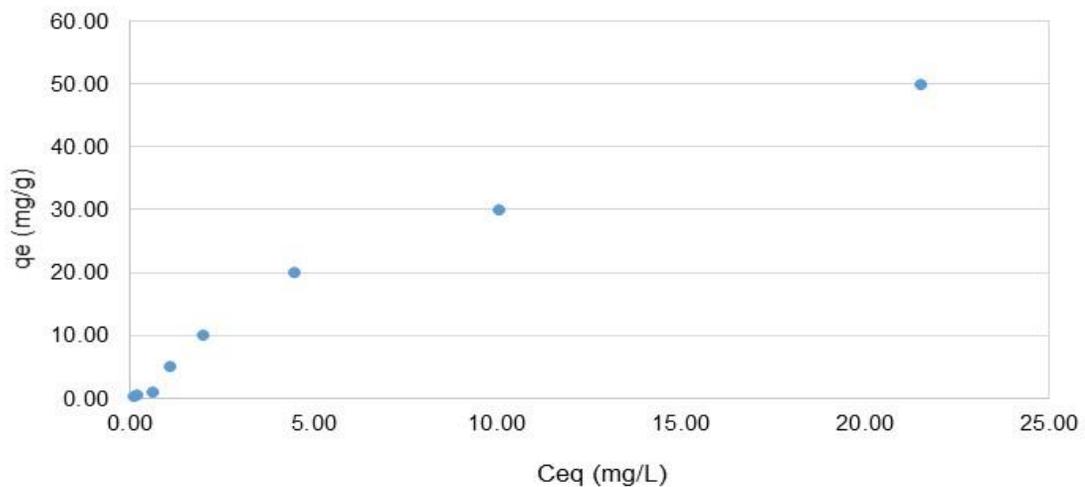


Figura 6.11 Isoterma de adsorción de plomo en semilla de *Moringa oleífera*.

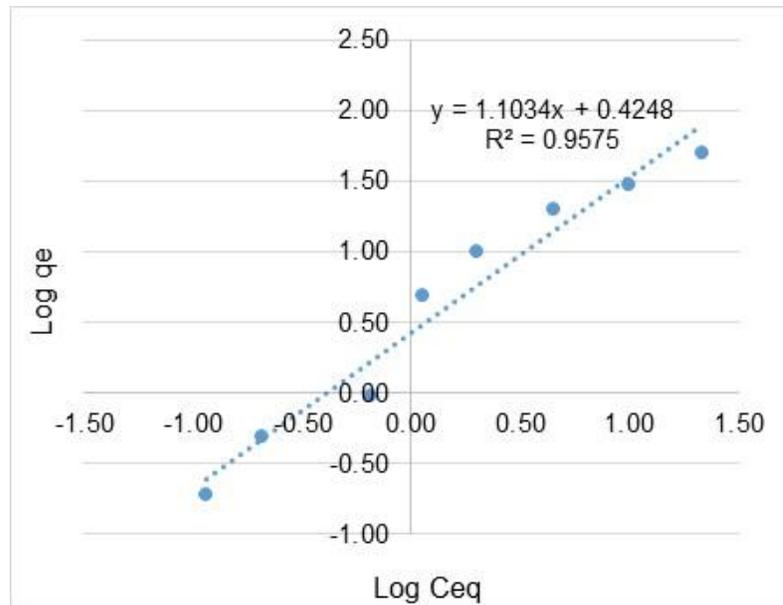
En la Figura 6.12.a se presenta el ajuste de los datos experimentales al modelo de Freundlich, mientras que en la Figura 6.12.b se muestra el ajuste al modelo de Langmuir. Ambos gráficos se obtuvieron utilizando la herramienta Excel, de manera similar a los casos del cobre y del zinc.

La gráfica del modelo linealizado de Freundlich (Figura 6.12.a) mostró un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9575, lo que indica un ajuste moderadamente bueno a los datos experimentales. En contraste, el modelo de Langmuir (Figura 6.12.b) presentó un R^2 de solo 0.008, lo que sugiere que este modelo no describe adecuadamente la adsorción de plomo en las semillas de *Moringa oleífera*, lo que descarta la adsorción en monocapa o en sitios homogéneos. Los resultados indican que el modelo de Freundlich es el que mejor se ajusta al proceso de adsorción del plomo.

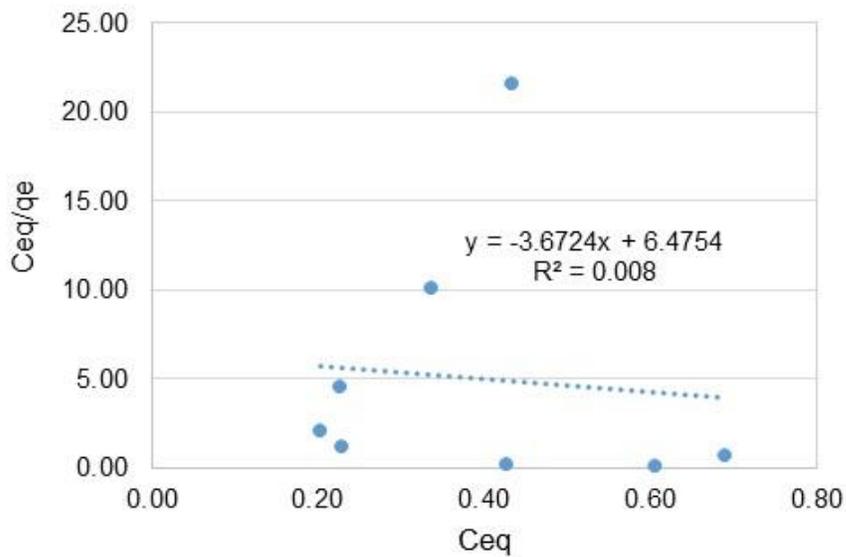
Estos hallazgos coinciden con los obtenidos en el caso del zinc, donde los datos experimentales también se ajustaron mejor al modelo de Freundlich, lo que sugiere que la adsorción de plomo ocurre sobre superficies heterogéneas y que es probable la formación de multicapas en el adsorbente.

Al igual que en el caso del zinc, el modelo de Freundlich ajustó mejor los datos experimentales de adsorción de plomo que el modelo de Langmuir, lo que sugiere que, para ambos iones, la adsorción ocurre en superficies heterogéneas.

En contraste, para el ion cobre, el modelo de Langmuir fue el que mejor describió el proceso de adsorción, lo que implica que los mecanismos de adsorción varían significativamente entre los diferentes metales y las características de los sitios activos disponibles en las semillas de *Moringa oleífera*.



(a) Modelo de Freundlich.



(b) Modelo de Langmuir.

Figura 6.12 Ajuste de los datos experimentales del equilibrio de adsorción de plomo a los modelos de Freundlich y Langmuir.

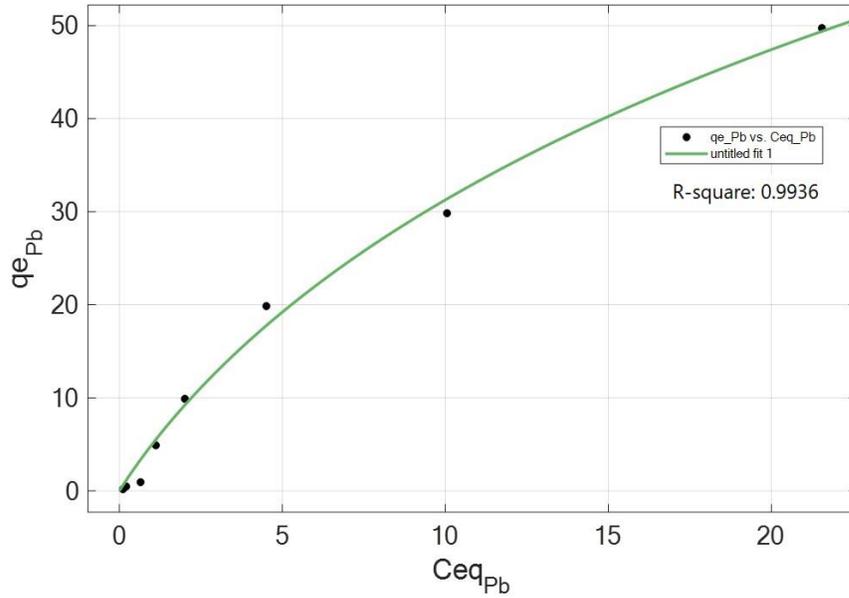
Al igual que para los iones de cobre y zinc, los datos experimentales de adsorción de plomo se ajustaron también a los modelos de Redlich-Peterson y Sips, utilizando la herramienta Curve Fitting Toolbox de Matlab. La Figura 6.13 muestra

las gráficas de la capacidad de adsorción (q_e) en función de la concentración de plomo en equilibrio (C_{eq}), junto con los ajustes correspondientes a estos modelos.

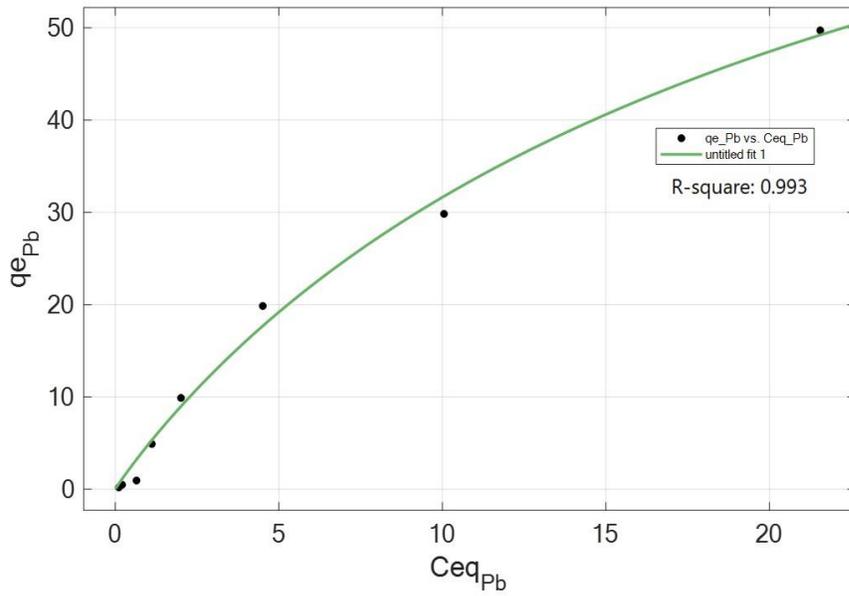
Los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos para los modelos de Redlich-Peterson y Sips fueron bastante similares, con valores de 0.9936 y 0.993, respectivamente, lo que indica un ajuste muy bueno a los datos experimentales. Estos resultados son superiores al correspondiente al modelo de Freundlich (R^2 de 0.9575). Este comportamiento es similar al observado para los iones de zinc, pero diferente al observado para los iones de cobre, donde los datos experimentales se ajustaron mejor al modelo de Langmuir.

Estos modelos, que combinan características tanto del modelo de Freundlich como del de Langmuir, reflejan un proceso de adsorción de los iones plomo en la semilla de *Moringa Oleífera* más complejo, con la posibilidad de sitios activos heterogéneos y homogéneos.

A pesar de que el modelo de Freundlich también describe bien el proceso de adsorción, los modelos de Redlich-Peterson y Sips sugieren que la adsorción podría involucrar tanto características de adsorción heterogénea como homogénea, con una mayor tendencia hacia la heterogeneidad.



(a) Modelo de Redlich-Peterson.



(b) Modelo de Sips.

Figura 6.13 Ajuste de los datos experimentales del equilibrio de adsorción de plomo a los modelos de Redlich-Peterson y Sips.

6.4.4 Parámetros de los Modelos de las Isotermas de Adsorción de los Iones Metálicos

Los parámetros de los modelos de Freundlich y Langmuir fueron calculados a partir de la pendiente y el intercepto de la forma lineal de las isotermas de adsorción de los iones de cobre, zinc y plomo en semilla de Moringa Oleífera, mostradas en cada una de las gráficas correspondientes. En la Tabla 6.4 se presentan los parámetros.

Tabla 6.4 Parámetros de los Modelos de Freundlich, Langmuir, Redlich-Peterson y Sips para los iones metálicos de cobre, zinc y plomo.

Ion Metálico	Modelo de Freundlich		Modelo de Langmuir		Modelo de Redlich-Peterson			Modelo de Sips		
	α_F	b_F	$q_{e,max}$	b	K_R	α_R	b_R	$q_{e,max}$	k_s	b_s
Cobre	0.789	0.566	14.16	0.051	2.707	0.547	0.822	17.44	0.025	1.651
Zinc	1.009	0.665	0.322	0.940	0.471	0.011	1.000	47.64	0.008	1.141
Plomo	2.659	1.103	0.272	0.567	5.660	0.136	0.776	99.93	0.045	1.038

Fuente: Elaboración propia.

Donde α_F es la constante de Freundlich del sistema adsorbato – adsorbente, b_F es un parámetro empírico que usualmente tiene valores menores que la unidad, $q_{e,max}$ (mg/g) es la capacidad máxima adsorbida por el adsorbente, b (g/L) es la constante de ligamiento, K_R es la constante de Redlich-Peterson, α_R es el parámetro de Redlich-Peterson y b_R es el factor exponencial de Redlich-Peterson el cual varía entre 0 y 1, k_s y b_s son constantes empíricas y parámetros de la isoterma, el parámetro $b_s = 1/n$ varía con el grado de heterogeneidad de la superficie del adsorbente.

VII. CONCLUSIONES

La evaluación del efecto del pH en la remoción de los iones metálicos plomo, cobre y zinc mostró que el pH de la solución es un factor crucial en la eficiencia de adsorción de estos iones metálicos cuando se utiliza semilla de *Moringa oleífera* como adsorbente. A medida que aumenta el pH, la remoción de iones metálicos mejora significativamente.

En cuanto al efecto de la masa del adsorbente, el análisis muestra que al incrementar la cantidad de *Moringa oleífera* se eleva el porcentaje de remoción de los iones metálicos en todos los casos.

La evaluación de la isoterma de adsorción de cobre confirma que el modelo de Langmuir es el más adecuado para describir este proceso en semilla de *Moringa oleífera*, sugiriendo una adsorción en monocapa sobre una superficie homogénea, sin interacciones entre los iones de cobre adsorbidos. En cambio, el ajuste de las isotermas de adsorción de plomo y zinc a los modelos de Redlich-Peterson y Sips sugiere que la adsorción de estos iones en *Moringa oleífera* es más compleja y ocurre en sitios con diferentes energías de adsorción, permitiendo la posible formación de multicapas de iones en la superficie del adsorbente.

VIII. RECOMENDACIONES

Evaluar el efecto de la granulometría del adsorbente: La eficiencia de adsorción puede estar influenciada por el tamaño de partícula del adsorbente. Realizar pruebas con diferentes granulometrías de la semilla de *Moringa oleífera* podría ayudar a identificar la mejor relación entre tamaño de partícula y porcentaje de remoción de los metales.

Incorporar pruebas con otros metales: Si el objetivo es desarrollar un adsorbente versátil, sería beneficioso probar el material con otros metales pesados de interés ambiental, como cadmio, mercurio o arsénico, para evaluar su efectividad y potencial como adsorbente en una gama más amplia de aplicaciones.

Estas recomendaciones, aplicadas a futuros estudios, permitirán obtener un perfil más completo del rendimiento de las semillas de *Moringa oleífera* como adsorbente, maximizando su aplicabilidad y eficiencia en la remoción de metales pesados.

IX. REFERENCIAS BIBIOGRÁFICAS

- Araújo, C.S.T., Alves, V.N., Rezende, H.C., Almeida, I.L.S., Assunção, R.M.N., Tarley, C.R.T., Segatelli, M.G. y Melo Coelho, N.M. (2010). *Characterization and use of Moringa oleifera seeds as biosorbent for removing metal ions from aqueous effluents*. Water Science & Technology, Vol. 62(9), pp.2198-203. doi: 10.2166/wst.2010.419.
- Al, J. e. (1990). Obtenido de Jyothi, P.V. et al. *Pollination ecology of Moringa oleifera (Moringaceae)*. Proceedings of the Indian Academy of Sciences (Plant Sciences). 100:33. 1990
- ATSDR. (2016). *Agencia para Sustancias Toxicas y el Registro de Enfermedades*. Recuperado el 15 de noviembre del 2022 de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs60.html
- Benettayeb A, Usman M, Tinashe CC, Adam T, Haddou B. (2022). *A critical review with emphasis on recent pieces of evidence of Moringa oleifera biosorption in water and wastewater treatment*. Environ Sci Pollut Res Int. 2022 Jul;29(32):48185-48209. doi: 10.1007/s11356-022-19938-w. Epub 2022 May 18. PMID: 35585450; PMCID: PMC9252946.
- Brownfields-Glossary (2008). *The Brownfields and Land Revitalization Technology Support Center*. Archivado desde el original el 18 de febrero de 2008. Recuperado el 21 de octubre de 2022 de <https://brownfieldstsc.org/glossary>.
- Carbotecnia. (2020). *Cobre*. Recuperado el 16 de noviembre del 2022 de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/cobre-en-el-agua/>
- Codelco-Innovación. (2020). *Usos del Cobre*. (Codelco, Editor) Recuperado el 16 de noviembre del 2022 de https://www.codelco.com/ usos-del-cobre/prontus_codelco/2011-06-03/223706.html
- Do, D.D. (1998). *Adsorption analysis: Equilibria and Kinetics*. Series on Chemical Engineering, Imperial College Press, pp. 61-78.
- Duarte, E., Olivero, J., & Jaramillo, B. (2009). *Remoción de cromo de aguas residuales de curtiembres usando quitosan obtenido de desechos de camaron*. Pereira, Colombia.
- Duarte, R., & Rodriguez, I. (1999). *Longitud y Biomasa de Sargassum sinicola Setchell et Gardner (Phaeophyta)*. Bahia Magdalena, Mexico.

- Facsa. (23 de Enero de 2017). *Metales Pesados*. Recuperado el 16 de noviembre de <https://www.facsa.com/metales-pesados/#:~:text=%C2%BFQU%C3%89%20ES%3F,%2C%20cobre%2C%20plomo%20y%20cromo>.
- Foidl, N., Mayorga, L., & Vásquez, W. (1999). *Utilización del marango (Moringa oleifera) como forraje fresco para el ganado. Conferencia electrónica de la FAO sobre agroforestería para la producción animal en América Latina*. Roma.
- Folkard, G. & Sutherland, J. (1996). *Moringa oleifera. Un árbol con enormes potencialidades*. Turrialba, Costa Rica.
- Garces Jaraba, E., & Coavas Romero, C. (2012). *Evaluación de la capacidad de adsorción en la cáscara de naranja (citrus sinensis) modificada con quitosano para la remoción de Cr (VI) en aguas residuales*. Cartagena de Indias, Colombia.
- Gerente, C., Lee, C., Cloirec, P., & MacKay, G. (2007). *Application of Chitosan for the removal of metals from wastewater by adsorption-Mechanisms and models review*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 37, 41-127.
- Gómez, A. (2002). *Monitoreo y Atención de intoxicados con Arsénico en el Zapote, San Isidro, Departamento de Matagalpa*. UNICEF-PIDMA-UNI, Nicaragua.
- Gonzalez, M. (2010). *Química*. Recuperado el 15 de Enero de 2019, de Química: <https://quimica.laguia2000.com/>
- Hernández, S., Cawich, Z., Gómez, M., & González, C. (2016). *Eficacia de la semilla de Moringa oleifera en el aclaramiento del agua*. *Revista Universidad y Ciencia*. Managua, Nicaragua. Vol. 9(14), pp. 31 - 44.
- La Prensa (2012). *Los diez paraísos más contaminados*. Publicado el 22 de marzo del 2012. Recuperado el 14 de febrero del 2023 de <https://www.laprensani.com/2012/03/22/nacionales/95027-los-10-paraisos-mas-contaminados#:~:text=Dos%20lagunas%20muertas%2C%20los%20dos,cercanos%2C%20Acahualinca%20lidera%20el%20escalaf%C3%B3n>.
- Lenntech. (2020a). *Propiedades del Plomo*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/pb.htm#:~:text=Es%20relativamente%20resistente%20al%20ataque,sales%2C%20%C3%B3xidos%20y%20compuestos%20organomet%C3%A1licos>.

- Lenntech. (2020b). *Cobre - Cu. Propiedades Químicas del Cobre - Efectos del Cobre sobre la Salud - Efectos del Cobre sobre el Medio Ambiente*. Recuperado el 16 de noviembre del 2022 de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm#Nombre>
- Lenntech BV. (2001). *Cobre - Cu*. Recuperado el 16 de noviembre del 2022 de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm#Nombre>.
- Moncada, J. & Munguía, E. (2008). *Evaluación de la calidad del agua potable en cuatro plantas potabilizadoras de la región Boaco – Chontales para el período de tiempo 2003 2007*. (Trabajo de grado en ingeniería química). Universidad Nacional de Ingeniería, Managua Nicaragua.
- Morton. (1991). Obtenido de 21. Morton, J.F. *The horseradish tree, Moringa pterigosperma (Moringaceae) A boon to arid lands?* Economic Botany. 45 (3):318. 1991.
- Muñoz, Rosario et al. (2008). *Una solución factible para la clarificación de aguas para consumo humano*. Revista Betsime. Recuperado el 14 de junio de 2022, de http://www.betsime.disaic.cu/secciones/tec_1_01.htm.
- NTIS. (2016). *Resúmenes de Salud Pública - Zinc (Zinc)*. Recuperado el 16 de noviembre del 2022 de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs60.html
- Obregón Valencia, D.C. (2012). *Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de cadmio utilizando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje y de aceituna*. Tesis para optar al título de Licenciado en Química. Pontificia Universidad.
- Orihuela, E. (2015). *Adsorción de disoluciones acuosas: isotermas de absorción y coeficientes de difusión*. Tesis Doctoral. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Químicas.
- Ortega, K. (2014). *Revisión de las características y usos de la planta moringa oleífera*. Barranquilla, Colombia.
- Özkahraman, B. (2017). *Synthesis of Ion – Imprinted Bioadsorbents Based on Chitosan and its Usage in Al (III) Removal*. Hitit University, Corum, Turkey
- Pérez, N., González, J. & Delgado, A. (2011). *Estudio termodinámico del proceso de adsorción de iones de ni y v por parte de ligninas precipitadas del licor negro kraft*. Rev. LatinAm. Metal. Mater. v.31 n.2 Caracas.

- Rica, U. N.-C. (2007). Obtenido de <https://www.vidaestudiantil.una.ac.cr/salud-perlassalud/1586-2007-10-el-plomo#:~:text=El%20Plomo%20es%20un%20metal,da%C3%B1o%20sobre%20la%20salud%20humana>.
- Rivera, E.V. & Martínez Bobadilla, R.S (2020). *Capacidad de Adsorción de Cromo en aguas sintéticas y aguas residuales de tenería en Semillas trituradas de Moringa oleífera*. Tesis para optar al título de Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua.
- Tejada, C., Villabona, Á. & Garcés, L. (2014). *Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico*. Cartagena, Colombia.
- Tenorio, E., Nuñez, E., & Guzmán, R. (2008). *Validación de la aplicación de la semilla de Moringa oleífera producida en el sur de Honduras como coagulante natural del agua destinada a consumo humano en la región de Yeguaré, Honduras*. Tegucigalpa, Honduras.

X. ANEXOS

Anexo A.1: Tabla de materiales y equipos de laboratorio

Tabla A.1.1 Lista de Materiales y Cristalería de laboratorio.

Cristalería	Capacidad
Beaker	250 ml, 1000 ml y 2000 ml
Matraz aforado	50 ml y 100 ml
Matraz Erlenmeyer	150 ml y 200 ml
Probeta graduada	100 ml
Pipeta	5 ml, 10 ml, 20 ml, 50 ml
Probeta graduada	1000 ml
Termómetro	120°C
Embudo Hirsch de Filtración	_____
Tamices	< 45 mm
Papel filtro	125 mm
Olla de acero inoxidable	2.5 L

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A.1.2 Lista de Equipos de laboratorio

Equipo	Marca
Espectrofotómetro de adsorción Atómica	6BC AAS 952 PLUS
Balanza Analítica	OHNUS SCOUT PRO
Horno	BARNSTEID-THERMOLYNE
Procesador de alimentos	Premier
pH – metro	OAKTON pH/CON Series 510
Agitador magnético	CORNING PC-420D
Molino de Cuchilla	Restch 6M 200
Shaker (Lab Rotator)	LAB-LINE

Fuente: Elaboración propia.

Anexo A.2: Tablas de los Resultados experimentales.

Tabla A.2.1 Resultados de isotermas de adsorción de cobre en semillas de *Moringa oleifera* con una masa de 0.50 g y un volumen de 50 ml.

[Cu ²⁺] inicial (mg/L)	Masa (g)	Volumen (L)	Ceq promedio (mg/L)	qe (mg/g)	Isotherma de Freundlich		Isotherma de Langmuir	
					log Ceq	log qe	Ceq/qe	Ceq promedio
2	0.50	0.05	0.33	0.17	-0.48	-0.78	2.00	0.33
5	0.50	0.05	0.66	0.43	-0.18	-0.36	1.51	0.66
10	0.50	0.05	0.80	0.92	-0.10	-0.04	0.87	0.80
50	0.50	0.05	2.53	4.75	0.40	0.68	0.53	2.53
100	0.50	0.05	28.75	7.13	1.46	0.85	4.03	28.75
200	0.50	0.05	95.46	10.45	1.98	1.02	9.13	95.46
300	0.50	0.05	167.52	13.25	2.22	1.12	12.64	167.52
500	0.50	0.05	365.51	13.45	2.56	1.13	27.18	365.51

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A.2.2 Resultados de isotermas de adsorción de zinc en semillas de *Moringa oleifera* con una masa de 0.50 g y un volumen de 50 ml.

[Zn ²⁺] inicial (mg/L)	Masa (g)	Volumen (L)	Ceq promedio (mg/L)	qe (mg/g)	Isotherma de Freundlich		Isotherma de Langmuir	
					log Ceq	log qe	Ceq/qe	Ceq promedio
2	0.50	0.05	0.09	0.19	-1.07	-0.72	0.45	0.11
5	0.50	0.05	0.30	0.47	-0.52	-0.33	0.65	0.21
10	0.50	0.05	1.16	0.88	0.06	-0.05	1.31	0.65
50	0.50	0.05	5.54	4.45	0.74	0.65	1.25	1.12
100	0.50	0.05	23.61	7.64	1.37	0.88	3.09	2.01
200	0.50	0.05	51.02	14.90	1.71	1.17	3.42	4.51
300	0.50	0.05	86.74	21.33	1.94	1.33	4.07	10.05
500	0.50	0.05	209.80	29.02	2.32	1.46	7.23	21.55

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A.2.3 Resultados de isotermas de adsorción de plomo en semillas de *Moringa oleifera* con una masa de 0.50 g y un volumen de 50 ml.

[Pb ²⁺] inicial (mg/L)	Masa (g)	Volumen (L)	Ceq promedio (mg/L)	qe (mg/g)	Isoterma de Freundlich		Isoterma de Langmuir	
					log Ceq	log qe	Ceq/qe	Ceq promedio
2	0.50	0.05	0.11	0.19	-0.94	-0.72	0.61	0.11
5	0.50	0.05	0.21	0.48	-0.69	-0.32	0.43	0.21
10	0.50	0.05	0.65	0.94	-0.19	-0.03	0.69	0.65
50	0.50	0.05	1.12	4.90	0.05	0.69	0.23	1.12
100	0.50	0.05	2.01	9.89	0.30	1.00	0.20	2.01
200	0.50	0.05	4.51	19.86	0.65	1.30	0.23	4.51
300	0.50	0.05	10.05	29.84	1.00	1.47	0.34	10.05
500	0.50	0.05	21.55	49.73	1.33	1.70	0.43	21.55

Fuente: Elaboración propia.

Anexo A.3: Figuras de procedimiento del descascarado de la semilla.



(a)



(b)

Figura A.3.1 (a) Semilla de *Moringa oleífera* y (b) Proceso de descascarado de la semilla.



(a)



(b)



(c)

Figura A.3.2 (a) Calentamiento del agua para el lavado de la semilla de *M. Oleífera*, (b) Secado de la semilla y (c) Semilla de *Moringa oleífera* descascarada y seca.



(a)



(b)



(c)

Figura A.3.3 (a) Introducción de la semilla de *Moringa oleífera* al procesador, (b) Semilla de *M. Oleífera* triturada en el procesador y (c) Semilla de *Moringa oleífera* triturada en el mortero.



(a)



(b)



(c)

Figura A.3.4 Proceso de extracción de aceite de *Moringa oleífera*: (a) Semilla de *Moringa oleífera* en la evaporadora con agua destilada, (b) proceso de calentamiento y (c) Separación del aceite de la semilla de *Moringa oleífera* triturada.



Figura A.3.5 Semilla de *Moringa oleífera* sin aceite, secada a 115°C.