

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE LAS SEMILLAS DE *Moringa oleifera*
PARA LA REMOCIÓN DE FLUORUROS
EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA AMBIENTAL**

MARÍA JOSÉ LÓPEZ CÓRDOVA
majo.lopezc@hotmail.es

DIRECTOR: Ing. Nathalia Teresa Valencia Bonilla, M.Sc.
nathalia.valencia@epn.edu.ec

CODIRECTOR: Ing. Víctor Hugo Guerrero Barragán, Ph.D.
victor.guerrero@epn.edu.ec

Quito, junio 2018

DECLARACIÓN

Yo, María José López Córdova, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

MARÍA JOSÉ LÓPEZ CÓRDOVA

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por María José López Córdova, bajo nuestra supervisión.

M.Sc. NATHALIA VALENCIA
DIRECTOR DEL PROYECTO

PhD. VICTOR HUGO GUERRERO
CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por estar en cada momento de mi vida, por ser él que me esforzó y alentó en mis momentos más difíciles y por cumplir con su promesa de siempre ayudarme y sustentarme con la diestra de su justicia.

A mis padres, Halbert y Janeth por apoyarme en todos los proyectos y en mi carrera universitaria, por su amor sincero y por darme un claro ejemplo de lucha, perseveración y constancia. A mis hermanos Holger, Juan Carlos y en especial a Andrés por darme su ayuda incondicional, por demostrarme que puedo contar con ellos en todo momento.

A mis buelitos y familia en general por su cariño y por estar pendiente de mi en todo momento y prestarme su ayuda.

A la ingeniera Nathalia Valencia, por su predisposición en la realización de esta investigación, por sus conocimientos brindados y su guía para el desarrollo de esta tesis.

Al doctor Víctor Guerrero, por su apoyo en la realización de este estudio que se trabajó en conjunto con el proyecto PIMI-14-18.

Al Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM), al Centro de Investigación y control Ambiental (CICAM) y al Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental por propocionarme espacio para el desarrollo de la investigación

A todas las personas que me brindaron su ayuda y su tiempo durante la investigación: Jairo J., Gaby T, Edison G., Felipe J., Pao J., Diana R., Mario G., Joselyn M., José B., Ritha A. y Belén LI. A mis amigos de la universidad por hacer que esta etapa de mi vida sea inolvidable.

DEDICATORIA

A Dios, porque él es el centro de mi vida, mi refugio y mi apoyo en los momentos más difíciles.

A Habert López y Janeth Córdova, por ser unos excelentes padres.

A mis hermanos Holger, Juan Carlos y Andrés por su apoyo durante mi carrera universitaria.

CONTENIDO

| | |
|---|------|
| DECLARACIÓN | ii |
| CERTIFICACIÓN | iii |
| AGRADECIMIENTOS | iv |
| DEDICATORIA..... | v |
| CONTENIDO..... | vi |
| ÍNDICE DE TABLAS | ix |
| ÍNDICE DE FIGURAS | x |
| SIMBOLOGÍA Y SIGLAS..... | xii |
| RESUMEN | xiii |
| ABSTRACT | xiv |
| PRESENTACIÓN | xv |
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. ANTECEDENTES..... | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS..... | 2 |
| 1.2.1. OBJETIVO GENERAL | 3 |
| 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 3 |
| 1.3. ALCANCE | 3 |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN..... | 4 |
| CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO..... | 5 |
| 2.1. AGUAS SUBTERRÁNEAS | 5 |
| 2.1.1. APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS | 6 |
| 2.1.2. CRITERIOS DE CALIDAD PARA AGUAS SUBTERRÁNEAS..... | 7 |
| 2.2. FLÚOR Y LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS..... | 9 |

| | |
|---|----|
| 2.3. ADSORCIÓN | 11 |
| 2.3.1. TIPOS DE ADSORCIÓN..... | 12 |
| 2.3.2. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN | 12 |
| 2.3.2.1 ISOTERMA DE LANGMUIR | 13 |
| 2.3.2.2 ISOTERMA DE FREUNDLICH..... | 15 |
| 2.4. BIOADSORBENTES..... | 16 |
| 2.4.1 APLICACIÓN DE SEMILLAS DE <i>Moringa oleifera</i> EN TRATAMIENTO DE AGUA | 17 |
| 2.4.1.1 ABLANDAMIENTO DE AGUAS | 20 |
| 2.4.1.2 COAGULANTE NATURAL..... | 20 |
| 2.4.1.3 ADSORCIÓN DE METALES PESADOS Y NUTRIENTES | 21 |
| CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA..... | 22 |
| 3.1. SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS SEMILLAS DE <i>Moringa oleifera</i> | 22 |
| 3.1.1. PREPARACIÓN DE LAS CÁSCARAS DE SEMILLAS DE <i>Moringa oleifera</i> | 22 |
| 3.1.2 PREPARACIÓN DEL COTILEDÓN DE LAS SEMILLAS DE <i>Moringa oleifera</i> | 23 |
| 3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS SEMILLAS DE <i>Moringa oleifera</i> | 23 |
| 3.2.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA..... | 23 |
| 3.2.2. MORFOLOGÍA..... | 24 |
| 3.2.3. MICROESTRUCTURA..... | 24 |
| 3.2.4. CARGA SUPERFICIAL..... | 25 |
| 3.3 PROCESO DE BIOADSORCIÓN | 25 |
| 3.3.1 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE FLUORURO | 25 |
| 3.3.2 OPERACIÓN DE REACTORES BATCH | 25 |
| 3.3.3 DETERMINACIÓN DE FLUORURO | 27 |
| CAPÍTULO 4: RESULTADOS y DISCUSIÓN..... | 28 |
| 4.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS SEMILLAS DE <i>Moringa oleifera</i> | 28 |

| | |
|--|----|
| 4.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA..... | 28 |
| 4.1.1.1. POTENCIAL HIDRÓGENO (pH) | 28 |
| 4.1.1.2 PORCENTAJE DE HUMEDAD..... | 29 |
| 4.1.1.3. CONTENIDO DE LIGNINA, HOLOCELULOSA Y CELULOSA | 30 |
| 4.1.2. MORFOLOGÍA..... | 30 |
| 4.1.3. MICROESTRUCTURA..... | 33 |
| 4.1.4. CARGA SUPERFICIAL..... | 36 |
| 4.2. PROCESO DE BIOADSORCIÓN..... | 37 |
| 4.2.1. TIEMPO DE EQUILIBRIO DE ADSORCIÓN | 37 |
| 4.2.2. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN | 44 |
| CAPÍTULO 5 | 49 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 49 |
| 5.1. CONCLUSIONES | 49 |
| 5.2. RECOMENDACIONES..... | 50 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 52 |
| ANEXOS | 65 |
| ANEXO N° 1: DATOS EXPERIMENTALES DE LA LIGNINA, HOLOCELULOSA Y CELULOSA..... | 66 |
| ANEXO N° 2: DATOS EXPERIMENTALES DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN PARA EL COTILEDÓN | 70 |
| ANEXO N° 3: DATOS EXPERIMENTALES DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN PARA LAS CÁSCARAS..... | 78 |
| ANEXO N° 4: DATOS EXPERIMENTALES DE LAS ISOTERMAS DE LANGMUIR Y FREUNDLICH DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> | 86 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| TABLA 2.1. REQUISITOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL AGUA POTABLE..... | 8 |
| TABLA 2.2. VALORES DE R_L PARA EL COMPORTAMIENTO DEL PROCESO DE ADSORCIÓN..... | 15 |
| TABLA 2.3. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE BIOADSORBENTES..... | 17 |
| TABLA 3.1. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICAS DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> | 24 |
| TABLA 3.2. ENSAYOS BATCH..... | 26 |
| TABLA 4.1. pH DEL COTILEDÓN Y CÁSCARA DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> A DISTINTOS TAMAÑOS DE PARTÍCULA..... | 28 |
| Tabla 4.2. PORCENTAJE DE HUMEDAD DEL COTILEDÓN Y CÁSCARA DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> | 29 |
| Tabla 4.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS CÁSCARAS DE <i>Moringa oleifera</i> | 30 |
| TABLA 4.4. EFICIENCIA DE LA ELIMINACIÓN DE FLÚOR (%) PARA EL COTILEDÓN DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> | 42 |
| TABLA 4.5. EFICIENCIA DE LA ELIMINACIÓN DE FLÚOR (%) PARA LA CÁSCARA DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> | 433 |
| TABLA 4.6. PARÁMETROS DE ADSORCIÓN DE LANGMUIR PARA EL COTILEDÓN Y CÁSCARA DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> | 46 |
| TABLA 4.7 PARÁMETROS DEL MODELO DE FREUNDLICH PARA EL COTILEDÓN Y CÁSCARA DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> | 47 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 2.1. PROCESO DE ADSORCIÓN | 11 |
| FIGURA 2.2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ISOTERMAS DE FREUNDLICH Y LANGMUIR..... | 13 |
| FIGURA 2.3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ECUACIÓN DE LANGMUIR LINEALIZADA | 14 |
| FIGURA 2.4. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ECUACIÓN DE FREUNDLICH LINEALIZADA | 16 |
| FIGURA 2.5. ÁRBOL DE <i>Moringa oleifera</i> | 18 |
| FIGURA 2.6. SEMILLAS DE <i>Moringa oleifera</i> | 19 |
| FIGURA 3.1. CÁSCARAS Y COTILEDÓN DE <i>Moringa oleifera</i> | 22 |
| FIGURA 3.2. PROCESO DE ADSORCIÓN | 26 |
| FIGURA 4.1. IMÁGENES SEM DEL COTILEDÓN DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> | 31 |
| FIGURA 4.2. IMÁGENES SEM DE LAS CÁSCARAS DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> | 32 |
| FIGURA 4.3. ESPECTRO FTIR DE LA SEMILLA DEL COTILEDÓN DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> | 33 |
| FIGURA 4.4. ESPECTRO FTIR DE LA SEMILLA DEL COTILEDÓN DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> | 34 |
| FIGURA 4.5. ESPECTRO RAMAN DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> | 35 |
| FIGURA 4.6. PUNTO DE CARGA CERO DEL COTILEDÓN Y CÁSCARA DE LA SEMILA DE <i>Moringa oleifera</i> | 37 |
| FIGURA 4.7. TIEMPO DE EQUILIBRIO DEL COTILEDÓN DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> COMO ADSORBENTE EN SOLUCIÓN DE FLUORUROS..... | 38 |
| FIGURA 4.8. TIEMPO DE EQUILIBRIO DE LA CÁSCARA DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> COMO ADSORBENTE EN SOLUCIÓN DE FLUORUROS..... | 39 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 4.9. CANTIDAD DE FLÚOR ADSORBIDO (mg/g) DE COTILEDÓN DE SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> | 40 |
| FIGURA 4.10. CANTIDAD DE FLÚOR ADSORBIDO (mg/g) DE COTILEDÓN DE SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> | 41 |
| FIGURA 4.11. ISOTERMAS NO LINEALIZADAS PARA LA ADSORCIÓN DE F ⁻ EN EL COTILEDÓN DE <i>Moringa oleifera</i> | 44 |
| FIGURA 4.12. ISOTERMAS NO LINEALIZADAS PARA LA ADSORCIÓN DE F ⁻ EN LAS CÁSCARAS DE <i>Moringa oleifera</i> | 45 |
| FIGURA AI.1 REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL ENSAYO DE TERMINACIÓN DE LIGNINA..... | 68 |
| FIGURA AI.2 REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL ENSAYO DE TERMINACIÓN DE CELULOSA..... | 69 |

SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

| | |
|---------------------------|---|
| AIDER | Asociación para la Investigación y Desarrollo Integral |
| AQUASTAT | Sistema de Información sobre el Uso del Agua en la Agricultura y el Medio Rural de la FAO |
| ASTM | American Society of Testing Materials |
| BTEX | Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno |
| CONAGUA | Comisión Nacional del Agua |
| Ce | Concentración de equilibrio (mg/L) |
| Cf | Concentración final (mg/L) |
| Co | Concentración inicial (mg/L) |
| FAO | Food and Agricultural Organization |
| FTIR | Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier |
| INEN | Servicio Ecuatoriano de Normalización |
| IGME | Instituto Geológico y Minero de España |
| K_L | Constante de Langmuir (L/mg). |
| K_f | Constante de la isoterma de Freundlich (L/mg). |
| M_{sólido} | Masa del sólido |
| n | Constante de la isoterma de Freundlich |
| OMS | Organización Mundial de la Salud |
| ONU | Organización de las Naciones Unidas |
| pH_{PCC} | Punto de carga cero |
| Qe | Capacidad de adsorción (mg/g) |
| Q_m | Capacidad de adsorción máxima (mg/g). |
| R_L | Constante de equilibrio de Langmuir |
| SEM | Microscopia Electrónica de Barrido |

RESUMEN

El consumo de agua con un alto contenido de flúor está presente en varias comunidades de la Sierra ecuatoriana, siendo perjudicial debido a que está directamente relacionado con afecciones de la salud de la población. En este trabajo se estudió la capacidad adsorbente de la cáscara y el cotiledón, de las semillas de *Moringa oleifera*, en la remoción de fluoruros.

El material adsorbente fue caracterizado por medio de análisis físicos-químicos, tales como: punto de carga cero (pH_{PCC}), FTIR y SEM. La capacidad de adsorción de la *Moringa oleifera* fue determinada a través de seis ensayos en batch, empleando las distintas partes de la semilla de *Moringa oleifera*, con tres tamaños de partícula (0.71, 0.30 y 0.21 mm) y cinco cantidades de adsorbente por ensayo (1, 2, 3, 4, y 5 g), utilizando dos concentraciones iniciales de flúor para cada uno de ellos (9 y 4 mg/L).

Los resultados experimentales se ajustaron al modelo de Langmuir para las cáscaras y al modelo de Freundlich para el cotiledón, con un coeficiente de correlación de 0.93 y 0.99, respectivamente. La capacidad de adsorción fue del 77% para el cotiledón y 80% para cáscara, utilizando un tamaño de partícula de 0.212 mm y una dosis de adsorbente de 5 g/L.

A partir de estos resultados se puede afirmar que la semilla de *Moringa oleifera* se presenta como un material eficiente para la remoción de fluoruros. Además, se trata de un material económico y se podría proyectar una aplicación para filtros unifamiliares en zonas rurales.

Palabras clave: *Moringa oleifera*, fluoruros, adsorción, aguas subterráneas

ABSTRACT

The consumption of water with a high fluoride content is a problem observed in several communities in the Ecuadorian highlands, which is malignant because it is directly related to the population health conditions. This work studied the adsorbent capacity of the shell and the cotyledon of *Moringa oleifera* seeds used for the removal of fluorides.

The material was characterized by means of physical-chemical analysis, point of zero charge (pH_{PCC}) of the material, FTIR and SEM. The adsorption capacity of *Moringa oleifera* was determined through six trials per batch, using the different parts of activated *Moringa oleifera* seed, with three particle sizes (0.71, 0.30 and 0.21 mm) and five samples of adsorbent per test (1, 2, 3, 4, and 5 g), using two concentrations of fluorine for each of them (9 and 4 mg / L).

The experimental results were adjusted to the Langmuir model for the categories and to the Freundlich model for the cotyledon, with a correlation coefficient of 0.93 and 0.99, respectively. The adsorption capacity was 77% for the cotyledon and 80% for the shell, using a particle size of 0.212 mm and a dose of adsorbent of 5 g / L.

The results obtained show that the *Moringa oleifera* seed is presented as an efficient material for the removal of fluorides. Besides being an economical material, an application for single-family filters can be projected in rural areas.

Keywords: *Moringa oleifera*, fluorides, adsorption, groundwater

PRESENTACIÓN

En esta investigación se estudió la capacidad de adsorción de flúor con las semillas de *Moringa oleifera*, el trabajo estuvo relacionado con el proyecto PIMI-14-18: Estudio de la utilización de materiales micro y/o nanoparticulados no convencionales para la remoción de metales pesados de aguas sintéticas. El manuscrito se divide en cinco capítulos y sus respectivos anexos.

El **Capítulo 1** “Introducción”, describe los antecedentes, los objetivos, alcance y justificación del estudio.

El **Capítulo 2** “Marco Teórico”, se dan detalles generales sobre el flúor, conceptos básicos sobre aguas subterráneas, *Moringa oleifera*, modelos de adsorción y la normativa ambiental vigente respecto al tema.

El **Capítulo 3** “Metodología”, se detallan los procedimientos aplicados en el estudio, de manera específica. En este capítulo se presenta la procedencia del material adsorbente, la caracterización del material y se detalla el procedimiento de los ensayos de adsorción realizados

El **Capítulo 4** “Resultados y Discusión”, se exponen los resultados obtenidos de la investigación. Adicionalmente, se discute los datos experimentales del comportamiento de las semillas e isothermas de adsorción.

El **Capítulo 5** “Conclusiones y Recomendaciones”, sintetiza toda la información adquirida en el trabajo con los resultados obtenidos en busca de cumplir los objetivos planteados, así también las recomendaciones generadas para una mejor investigación.

En la sección **Anexos**, se encuentran todos los resultados numéricos detallados del estudio.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La accesibilidad al agua potable es un importante problema a nivel global (Amagloh y Benang 2009). Del total de agua en el planeta, el agua dulce constituye únicamente el 2.5%; de esta cantidad, el 30% del agua es subterránea (CONAGUA, 2011). De acuerdo con datos de AQUASTAT (Sistema de información sobre el uso del agua en la agricultura y el medio rural de la FAO, 2016) las extracciones de agua dulce en el mundo en zonas rurales corresponden a 3 928 km³/año.

En Ecuador, el volumen de agua consumida se acerca a los 414'000 173 m³/año, de los cuales el 28.9%, corresponde a la explotación de fuentes subterráneas (INEC, 2013). Las provincias donde utilizan el agua subterránea para satisfacer sus necesidades de consumo son: Chimborazo, Guayas, Los Ríos, Pichincha, Tungurahua y Orellana (INEC, 2013).

Las aguas subterráneas se caracterizan por presentar valores de pH que varían entre 6.5 y 8.5, DQO entre 1 y 5 mg/L de O₂ (Arbitto, 2015) y sus constituyentes químicos minoritarios son: S⁻², Br, I, PO₄⁻³, BO₃⁻, F⁻, Fe²⁻, Mn²⁺, Zn²⁺ (Rubio, 2015). Sin embargo, estos constituyentes químicos minoritarios pueden sobrepasar los criterios de calidad para agua de abastecimiento, tal como ocurre en fuentes de agua de la Sierra Central del Ecuador con los fluoruros (Manciati, 2014). Las aguas subterráneas que provienen de formaciones de rocas consolidadas son más contaminadas que aquellas que provienen de grava, arena o arcilla (Proaño & Gastón, 2009).

Puesto que la explotación de aguas subterráneas para abastecimiento en Ecuador se realiza en las parroquias rurales, es necesario buscar alternativas de tratamiento

de agua para consumo humano, de manera que disminuya la concentración de fluoruros (Yubaille, 2017).

El flúor, en concentraciones bajas, desde 0.7 a 1.2 mg/L, son esenciales para la formación de huesos, disminución de caries dentales, etc. Sin embargo, la OMS indica que concentraciones por encima de 1.5 mg/L son perjudiciales para la salud, ocasionando: la fluorosis, la descomposición y curvatura de los huesos, enanismo, trastornos mentales, cáncer, etc. y en casos extremos incluso la muerte (Vivek & Karthikeyan, 2011). La norma técnica ecuatoriana INEN 1 108:2011 fija el límite máximo permisible de los fluoruros (total) en 1.5 mg/L.

Con el fin de aportar con alternativas para resolver esta problemática, el presente trabajo busca evaluar la capacidad de adsorción de flúor con semillas de *Moringa oleifera*, debido a sus características químicas y físicas que posee para el tratamiento de aguas (Campos et al., 2003). Con esto se busca definir una alternativa que podría ser implementada en el tratamiento de agua para abastecimiento, como bioadsorbente para la remoción de fluoruros. Esto se logrará mediante experimentación en reactores batch, donde se variará condiciones de: dosis de adsorbente, concentración inicial de fluoruros, partes de la semilla, tamaño de partícula. El estudio buscará definir las condiciones óptimas para la remoción de este analito.

1.2. OBJETIVOS

A continuación se presentan el objetivo general y los objetivos específicos planteados para este trabajo.

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad de remoción de fluoruros de las semillas de *Moringa oleifera* mediante procesos de adsorción, para su aplicación como bioadsorbente en el tratamiento de aguas de abastecimiento.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar física y químicamente los residuos de semilla de *Moringa oleifera* como medio bioadsorbente utilizado para el tratamiento de aguas subterráneas.
- Analizar el comportamiento de las semillas de *Moringa oleifera* como material bioadsorbente variando los valores de tamaño de partícula, cantidad de sorbente empleado, concentración inicial del sorbato y tiempos de contacto para la eliminación de flúor.
- Determinar la isoterma característica aplicando modelos de Langmuir y Freundlich para analizar el proceso de adsorción

1.3. ALCANCE

El estudio de las semillas de *Moringa oleifera* como adsorbente de fluoruros, incluye el análisis mediante un sistema por lotes, de la remoción de fluoruros en un agua sintética.

Las partes evaluadas de *Moringa oleifera* fueron: el cotiledón y las cáscaras, mismas que poseen características reportadas en la bibliografía, que potencian su uso en este tipo de tecnologías como bioadsorbente (Losada et al, 2015; Gómez, 2013).

Esta investigación busca contribuir con el estudio de las semillas de *Moringa oleifera* como bioadsorbente, registrando su eficiencia de retención de flúor y exponiendo los modelos matemáticos conocidos como isotermas de adsorción, que caracterizan el mecanismo de adsorción de fluoruros en la *Moringa oleifera*.

1.4. JUSTIFICACIÓN

En las provincias de Chimborazo y Tungurahua, existen una alta concentración de flúor (1.7 mg/L y 2.5 mg/L, respectivamente) en aguas de abastecimiento (Orellana, 2016; Escudero, 2016), sobrepasando los límites máximos permisibles recomendados por la OMS (1.5 mg/L). Debido a estas concentraciones, la población presenta cuadros de enfermedades como fluorosis por la ingesta de agua con presencia de este contaminante (Arroyo, 2016; Alvarado 2014).

Se escoge un bioadsorbente por su bajo costo respecto a otras tecnologías y materiales empleados en la remoción de fluoruros (Dobaradaran et al, 2015). Las semillas de *Moringa oleifera* tienen procesos involucrados y relacionados con su aplicación tecnológica como bioadsorbente debido a su composición química (Losada, et al., 2015), ya que contienen cantidades de aminoácidos polares con cargas netas positivas y negativas que contribuyen a la eliminación de partículas coloidales o metales pesados (Caldera, et al., 2007).

La evaluación de la semilla de *Moringa oleifera* como bioadsorbente contribuirá en el desarrollo de tecnologías de tratamiento para su aplicación a nivel unifamiliar aplicada en zonas rurales. Esto se relaciona con su bajo costo, menor producción de lodos, favorable al ambiente y viabilidad económica reportada (Dobaradaran et al, 2015; Feria, 2014).

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las aguas subterráneas constituyen la mayor reserva de agua dulce en el mundo con un 97% del total de agua dulce en el planeta, excluyendo glaciares y casquetes polares (Bellino, 2012). Estos cuerpos de aguas provienen de la lluvia, nieve o ríos que se infiltran a través de las diferentes capas de la tierra (Rubio, 2015). Así pues, por el contacto que tiene con varias sustancias, las aguas subterráneas poseen características particulares: son claras, frías, sin color y más duras que las aguas superficiales (Landa, 2016).

La porosidad y estructura de las rocas determina el tipo de acuífero y la circulación de las aguas subterráneas, encontrándose estas bajo el nivel freático (Orellana, 2016). Asimismo, estas aguas pueden fluir de manera natural hacia la superficie por medio de manantiales, caudales fluviales, o directamente hacia el mar y de manera artificial a través de pozos (Tenelema, 2017).

La composición de las aguas subterráneas puede contemplarse desde diferentes puntos de vista: físico, químico, bacteriológico, etc. En un agua natural subterránea, la mayoría de sustancias están en estado iónico, donde diferentes constituyentes se hacen presentes:

- Constituyentes químicos mayoritarios

Aniones: bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}), cloruro (Cl^-), nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}).

Cationes: amonio (NH_4^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), potasio (K^+),

- Constituyentes químicos minoritarios

Aniones: sulfuro (S^{-2}), Br^{-} , yoduro (I^{-}), nitrito (NO_2^{-}), fosfato (PO_4^{-3}), BO_3^{-} , fluoruro (F^{-})

Cationes: hierro (Fe^{+2}), Mn^{+2} , litio (Li^{+}), estroncio (Sr^{+}), zinc (Zn^{+2})

- Constituyentes químicos en trazas

Aluminio (Al^{+}), cobre (Cu^{+2}), plomo (Pb^{+2}), níquel (Ni^{+2}), cromo (Cr^{+2}), cobalto (Co^{+2})

Los diferentes tipos de uso que se dan a las aguas subterráneas, ya sea para consumo humano, riego o uso industrial, están determinados por sus características físicas y químicas. Por lo tanto, es indispensable la caracterización de la misma (Arbitó, 2015).

2.1.1. APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las aguas subterráneas son utilizadas directamente por el hombre, principalmente en zonas donde el recurso hídrico superficial es escaso. Sin embargo, a nivel mundial el abastecimiento de agua para las diferentes actividades del hombre tiene en mayor o menor porcentaje un componente de aporte de aguas subterráneas.

El uso de aguas subterráneas como fuente potable, se debe a la falta de abastecimiento tanto en la zona urbana como rural, debido a que su utilización representa una manera rápida y económica de solventar este problema (Bellino, 2012).

El uso de aguas subterráneas en la agricultura permite solucionar los problemas de regadío, sin tener que esperar las soluciones propiciadas por el estado, disponiendo del agua justo en el momento que se requiera (Ordoñez, 2011).

El agua subterránea también es importante para las industrias, ya que se asume que es una fuente de agua confiable y de calidad, para realizar los distintos procesos industriales. Adicionalmente, la captación puede estar ubicada dentro de la misma industria, resultando en un ahorro económico (Ordoñez, 2011).

2.1.2. CRITERIOS DE CALIDAD PARA AGUAS SUBTERRÁNEAS

La calidad del agua (subterránea o superficial) depende tanto de factores naturales como de la acción humana (Ramos, 2016). La calidad de agua se define como las condiciones óptimas en que se encuentra el agua con respecto a características: químicas, físicas o biológicas, con el fin de garantizar todos sus usos posibles (Orellana, 2016).

En el agua están presentes varios compuestos químicos propios de su naturaleza y otros de origen industrial, dependiendo de la concentración en que se encuentren disueltos en el agua, causarán algún tipo de daño a la salud humana, por lo cual deben ser medidos y monitoreados (Landa, 2016).

Las aguas subterráneas son contaminadas de forma natural generalmente por la relación que hay entre la dinámica del flujo de agua y los asentamientos donde se encuentran ubicadas estas aguas (Tenelema, 2017). La calidad de agua subterránea se ve afectada generalmente por problemas causados por: dureza, manganeso, sulfuro, sulfato y cloruro sódico, entre otros (Arbitto, 2014).

El Instituto Ecuatoriano de Normalización mediante la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1108, quinta revisión 2014-01, establece los requisitos que debe cumplir el agua potable para consumo humano. En la Tabla 2.1 se puede observar los parámetros establecidos por la norma.

TABLA 2.1. REQUISITOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL AGUA POTABLE

| PARÁMETROS | UNIDAD | Límite máximo permitido |
|---|----------------------------------|-------------------------|
| Características físicas | | |
| Color | Unidad de color aparente (Pt-Co) | 15 |
| Turbiedad [NTU] | NTU | 5 |
| Olor | ----- | No objetable |
| Sabor | ----- | No objetable |
| Concentración de iones | | |
| Antimonio, Sb | mg/L | 0.02 |
| Arsénico, As | mg/L | 0.01 |
| Bario, Ba | mg/L | 0.7 |
| Boro, B | mg/L | 2.4 |
| Cadmio, Cd | mg/L | 0.003 |
| Cianuro, CN- | mg/L | 0.07 |
| Cloro libre residual * | mg/L | 0.3 a 1.5 ¹⁾ |
| Cobre, Cu | mg/L | 2 |
| Cromo, Cr (cromo total) | mg/L | 0.05 |
| Fluoruros | mg/L | 1.5 |
| Mercurio, Hg | mg/L | 0.006 |
| Níquel, Ni | mg/L | 0.07 |
| Nitratos, NO ₃ - | mg/L | 50 |
| Nitritos, NO ₂ - | mg/L | 3 |
| Plomo, Pb | mg/L | 0.01 |
| Radiación total α^* | Bq/L | 0.5 |
| Radiación total β^{**} | Bq/L | 1 |
| Selenio, Se | mg/L | 0.04 |
| <p>1) Rango en el que debe estar el cloro libre residual luego de un tiempo mínimo de contacto de 30 minutos.</p> <p>*Corresponde a la radiación emitida por los siguientes radionucleídos: 210 Po, 224 Ra, 226 Ra, 232 Th, 234 U, 238 U, 239 Pu</p> <p>**Corresponde a la radiación emitida por los siguientes radionucleídos: 60 Co, 89 Sr, 90 Sr, 129 I, 131 I, 134 Cs, 137 Cs, 210 Pb</p> | | |

Fuente: NTE INEN 1108:2014. Agua potable. Requisitos. 2014.

En este contexto, se verifica que las aguas subterráneas desempeñan un papel fundamental en el suministro de agua para el consumo humano, animal, para la irrigación en la agricultura, en el sector industrial, entre otras actividades. Esto hace necesario el mantenimiento y preservación de este recurso natural.

2.2. FLÚOR Y LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El flúor (F), es el elemento químico que conserva un número atómico de nueve en la distribución de la tabla periódica, su punto de ebullición es a $-188\text{ }^{\circ}\text{C}$ y su punto de congelación es de $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Arroyo, 2016). Además, el flúor pertenece al grupo de los halógenos, se caracteriza por ser el elemento más electronegativo teniendo la capacidad de reaccionar con todos los elementos químicos (excepto con el helio, argón y criptón) y en estado natural toma un aspecto gaseoso de color amarillento y olor muy irritante, siendo altamente peligroso y corrosivo (Masquetti, 2012; Charco, 2017).

Por otra parte, el flúor es el décimotercer elemento más abundante en la naturaleza presentándose en la corteza terrestre de forma abundante, similar a los elementos de aluminio, carbono, y hierro. El contenido de flúor en la litósfera varía entre 100 y 1500 g/ton, está presente en muchos minerales tales como: la fluorita (CaF_2), criolita (Na_3AlF_6), apatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$], fluorapatita ($\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_6$), topacio $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH},\text{F})_2$ (Arroyo, 2016; Vivek & Karthikeyan, 2011; Masquetti, 2012).

La formación geológica es la principal fuente de flúor en las aguas, se encuentra disuelto en el agua en forma de ácido fluorhídrico llevando a su ion característico F^- (Escudero, 2016). En aguas subterráneas, la concentración de fluoruros depende de la geología, la porosidad y acidez del suelo y rocas, temperatura, entre otros (Masquetti, 2012).

La contaminación de aguas subterráneas por flúor puede ocurrir por factores naturales como emisiones volcánicas, así como también pueden ser generadas por

actividades humanas en las industrias de aluminio, cerámica, ladrillo, vidrio y plantas de carbón son otras fuentes de flúor. Estas emisiones de flúor pueden llegar a la atmósfera y posteriormente a la deposición y concentración en el suelo, infiltrándose y llegando así a los cuerpos de agua (Parlikar & Mokashi 2013; Charco, 2017).

A pesar de que existen varias fuentes de ingesta de flúor, se estima que aproximadamente el 60% de la ingesta total es a través del agua potable (Parlikar & Mokashi 2013). Asimismo, en concentraciones bajas desde 0.7 a 1.2 mg/L el flúor ayuda a la formación de huesos, y a la prevención de caries dentales. Por el contrario, en concentraciones altas mayores a 1.5 mg/L los fluoruros son más tóxicos que el plomo (Parlikar & Mokashi 2013).

La contaminación por fluoruros en el agua es una problemática de salud pública, ya que con el tiempo se va acumulando en el organismo humano, específicamente en la glándula pineal provocando enfermedades como: fluorosis, descomposición de los huesos, curvatura de los huesos, enanismo, trastornos mentales, daños en el ADN, disfunción de la tiroides, desequilibrio hormonal, depresión, tumores cerebrales, envejecimiento prematuro, enfermedades cardíacas, hipertensión arterial, alzheimer, parkinson y cáncer (Vivek & Karthikeyan, 2011; Orellana, 2016).

La intoxicación de agua con flúor tiene como consecuencias náuseas, debilidad muscular, escalofrío, vómito, mareo, depresión del sistema nervioso, dolor abdominal, palidez, convulsiones, y hasta la muerte (Alvarado, 2014). La Organización Panamericana de la Salud y el Ministerio de Salud Pública del Ecuador identificaron tres provincias con riesgos de fluorosis dental: Chimborazo, Tungurahua y Cotopaxi (Arroyo, 2016).

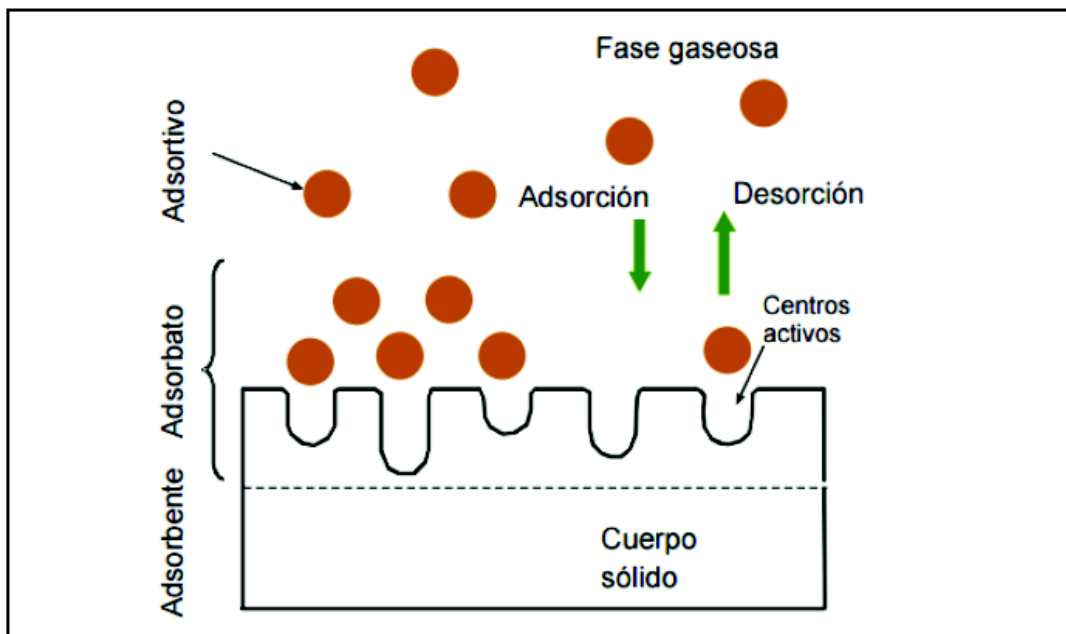
Existen varias técnicas de tratamiento para la remoción de fluoruros, entre los más comunes se encuentran: la coagulación-floculación (ablandamiento con cal), procesos de filtración de membrana (ósmosis inversa, nanofiltración, electrodiálisis), destilación, adsorción e intercambio iónico (usando carbón

activado, zeolitas, alúmina activada, bentonita, hidroxiapatita), etc. (Neeraj, 2015; Asqui, 2018). Ya se han establecido estudios de eliminación de flúor donde se utiliza varios materiales biológicos de bajo costo, como la cáscara de arroz, cáscara de huevo y semillas de *Moringa oleifera* (Anandu et al, 2015; Vega, 2017)

2.3. ADSORCIÓN

La adsorción se define como un proceso físico-químico de separación, donde las moléculas de una fase líquida o gaseosa se difunden hacia un sólido adsorbente adhiriéndose a su superficie (Richardson et al, 2012). La sustancia que se adhiere a la superficie se llama “adsorbato” mientras que la fase sólida se llama “adsorbente” (Vera & Morocho, 2015). La Figura 2.1 ilustra gráficamente la forma en que se produce un proceso de adsorción.

FIGURA 2.1. PROCESO DE ADSORCIÓN



FUENTE: Vera y Morocho, 2015

2.3.1. TIPOS DE ADSORCIÓN

El proceso de adsorción se puede efectuar de tres maneras, en función de las fuerzas que interactúan entre adsorbente y adsorbato: adsorción física, adsorción química y adsorción por intercambio iónico.

La adsorción física se produce cuando la atracción entre adsorbente y adsorbato son causadas por fuerzas denominadas de Van der Waals. La adsorción es rápida y reversible debido a que el enlace que los une es débil y solamente es necesario elevar la temperatura para retirar el adsorbato (Andrade, 2015).

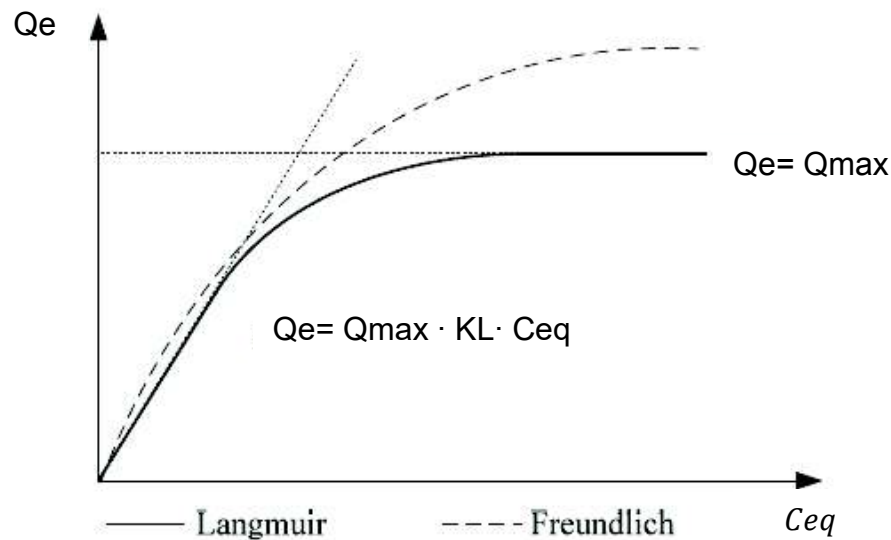
En la adsorción química, la retención del adsorbato sobre la superficie del adsorbente se produce por fuerzas químicas, estas fuerzas son más fuertes debido a que son provocadas por el intercambio de electrones entre moléculas (García, 2010).

En la adsorción por intercambio iónico, el enlace entre el adsorbato y adsorbente se da por el resultado de la atracción electrostática entre iones de carga opuesta, uniéndose el adsorbato a la superficie del adsorbente por las cargas opuestas presentes en cada uno (anión si es carga positiva y catión si es carga negativa) (McCarty et al., 2001; Deutsch, 1997).

2.3.2. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Las isotermas de adsorción describen el equilibrio del adsorbato sobre la superficie del adsorbente a una temperatura constante (Vera & Morocho, 2015). A través del tiempo se han desarrollado varios modelos de isotermas de adsorción, sin embargo por su simplicidad y sencillez se destacan las isotermas de Langmuir y Freundlich (García, 2010). La Figura 2.2 muestra gráficamente las diferencias entre estos dos modelos.

FIGURA 2.2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ISOTERMAS DE FREUNDLICH Y LANGMUIR



FUENTE: García, 2010

2.3.2.1 ISOTERMA DE LANGMUIR

La isoterma de Langmuir supone que la adsorción se da de manera homogénea, es decir, la energía de adsorción es constante en todos los centros activos, formándose una capa monomolecular (Andrade, 2015). Esta isoterma viene dada por la ecuación (2.1) (Haro, 2016):

$$Q_e = \frac{Q_{max} \cdot K_L \cdot C_{eq}}{1 + (K_L \cdot C_{eq})} \quad (2.1)$$

Donde:

Q_e : cantidad de adsorbato sorbido, por peso unitario de adsorbente (mg/g)

Q_{max} : máxima cantidad de adsorbato que se puede sorber por unidad de peso del adsorbente (mg/g)

K_L : constante de Langmuir (L/mg)

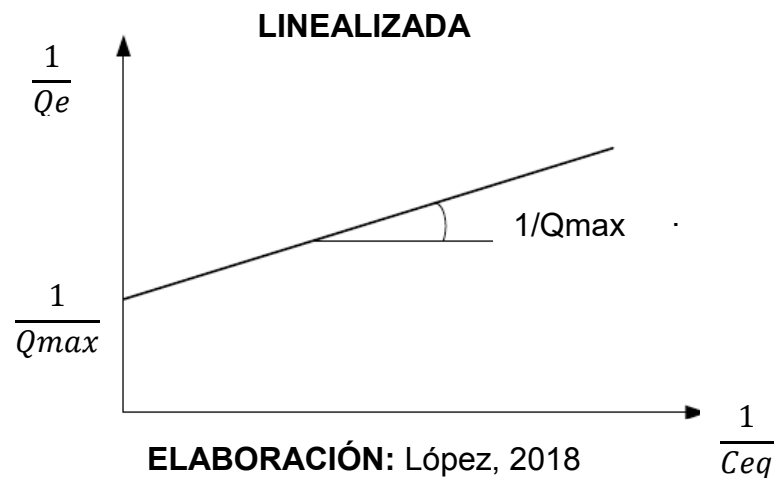
C_{eq} : concentración en equilibrio (mg/L)

Modelo linealizado:

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{Q_{\max} \cdot K_L} \times \frac{1}{C_{eq}} + \frac{1}{Q_{\max}} \quad (2.2)$$

A partir de la representación gráfica entre (C_{eq}/Q_e) y (C_{eq}) se obtienen los valores de los parámetros K_L y Q_{\max} como muestra la Figura 2.3 (Haro, 2016):

FIGURA 2.3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ECUACIÓN DE LANGMUIR



Por otro lado, una característica de la isoterma es expresada por la constante adimensional, llamada parámetro de equilibrio (R_L), cuyo valor corresponde al grado de adsorción (Queiroz, 2015). La expresión se define como la ecuación (2.3)

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L \cdot C_{eq}} \quad (2.3)$$

Donde:

R_L : parámetro de equilibrio de Langmuir

K_L : constante de Langmuir (L/mg)

C_{eq} : concentración en equilibrio (mg/L)

La Tabla 2.2 muestra la relación entre el tipo de isoterma y el valor de R_L (Queiroz, 2015).

TABLA 2.2. VALORES DE R_L PARA EL COMPORTAMIENTO DEL PROCESO DE ADSORCIÓN

| Valor de R_L | Tipo de Isotherma |
|----------------|-------------------|
| $R_L > 1$ | Desfavorable |
| $R_L = 1$ | Lineal |
| $R_L < 1$ | Favorable |
| $R_L = 0$ | Irreversible |

ELABORACIÓN: López, 2018

2.3.2.2 ISOTERMA DE FREUNDLICH

La isoterma de Freundlich supone que la adsorción tiene lugar de manera heterogénea es decir, existe una distinta capacidad de adsorción en cada punto activo del sólido, cada uno con un tipo diferente de energía de adsorción (García, 2010). La expresión de Freundlich está dada por la ecuación (2.4)

$$Q_e = K_F \cdot C_{eq}^{1/n} \quad (2.4)$$

Donde:

Q_e : cantidad de adsorbato sorbido, por peso unitario de adsorbente (mg/g)

Q_{max} : máxima cantidad de adsorbato que se puede sorber por unidad de peso del adsorbente (mg/g)

K_F : constante de Freundlich, está relacionado con la capacidad de adsorción del material (L/mg)

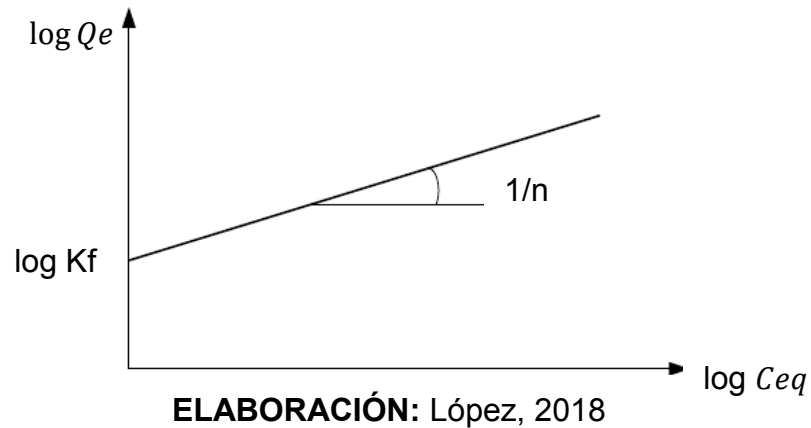
n : constante de Freundlich, es el factor de heterogeneidad (adimensional)

Modelo linealizado:

$$\log Q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \cdot \log C_{eq} \quad (2.5)$$

A partir de la representación gráfica entre $(\log K_F)$ y $(\log C_{eq})$ se obtienen los valores de los parámetros K_F y n (Moreno, 2013).

FIGURA 2.4. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ECUACIÓN DE FREUNDLICH LINEALIZADA



2.4. BIOADSORBENTES

La bioadsorción es una técnica alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas respecto a los métodos convencionales (Ordoñez 2014). Así, la bioadsorción es un proceso físico-químico que adsorbe moléculas e iones a través de biomasa inactiva o muerta (bioadsorbente) con características que permiten mecanismos de interacción electrostática o intercambio iónico (Tejada, Villabona & Garcés 2014).

Por otro lado, para utilizar un material como bioadsorbente debe ser: económico, disponible en abundancia, considerado como residuo, fácil de obtener y sobre todo

tener grupos químicos activos en sus estructuras (Moreno, 2013). Siendo así, entre los bioadsorbentes más usados están microorganismos como: algas, hongos y levaduras. Entre biomasa considerada como residuos están: cascarilla de arroz, cáscara de plátano, cáscara de naranja, cáscara de maní, quitosano, entre otros (Tejada, Villabona & Garcés 2014). En la Tabla 2.3 se puede apreciar las eficiencias de remoción que tienen los distintos bioadsorbentes.

TABLA 2.3. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE BIOADSORBENTES

| Bioadsorbente | Contaminante | Eficiencia (%) | Referencia |
|---------------------|--------------|----------------|----------------|
| Cáscarilla de arroz | Flúor | 88.8 | Anandu, 2015 |
| Cáscara de plátano | Arsénico | 99.4 | Ríos, 2014 |
| Cáscara de naranja | Plomo | 99.73 | Ordóñez,2014 |
| Quitosano | Crudo | 76.20 | Andrade, 2015 |
| Borra de café | Fosfatos | 95.06 | Moreno, 2013 |
| Laurel | Zinc | 98.95 | Asimbaya, 2016 |

ELABORACIÓN: López, 2018

2.4.1 APLICACIÓN DE SEMILLAS DE *Moringa oleifera* EN TRATAMIENTO DE AGUA

Moringa oleifera, es una especie vegetal de la familia de las Moringáceas originaria de la India, crece en zonas tropicales a una altura sobre el nivel del mar aproximadamente a 1 400 m de altitud. Se caracteriza por su rápido crecimiento y resistencia a la sequía alcanzando una altura de hasta 4 m sin un cuidado previo (Melo y Turriago, 2012; Murrieta, 2014).

Esta planta ha sido utilizada por griegos y egipcios por más de 2000 años con fines alimenticios por el valor nutritivo que contiene las hojas y semillas de *Moringa oleifera*. De igual manera tiene un aprovechamiento farmacéutico debido a su acción antiinflamatoria y diurética por infusiones de las semillas, tallos raíces y hojas de *Moringa oleifera* (Gómez, 2013).

Desde el punto de vista industrial, la semilla es aprovechada para la extracción de su aceite que se utiliza para producir jabones, en la cocina, en perfumería, como lubricante de maquinaria fina o como combustible para lámparas (FAO, 1996). Así también, sus semillas son utilizadas para la purificación del agua ya que tiene componente un químico que funciona como agente removedor de bacterias gracias a la ptergospermina que contiene en su semilla y como coagulante natural (Molano, 2011).

FIGURA 2.5. ÁRBOL DE *Moringa oleifera*



ELABORACIÓN: López, 2018

Las semillas de *Moringa oleifera* se cultivan dos veces durante todo el año y generan en un promedio de 5500 semillas/árbol (Haro, 2015). Dentro de las características físicas está su coloración parda, son carnosas y globulares con tamaños de 1 cm, peso promedio de 0.3 g/semilla (Molano, 2011). Cada 100 g de

núcleo de semilla de *Moringa oleifera* contiene 38.4 g de proteínas crudas, 34.7 g de ácidos grasos, 16.4 g de nitrógeno libre, 3.5 g de fibra y 3.2 g de materia inorgánica (Lagos, 2017).

Entre las propiedades químicas de la semilla está el contenido en peso seco del 25% al 30% de aceite, glucósidos, ptergospermina, 4-benzilisocianato y trazas de alcaloides (Gómez, 2013); y contienen cantidades de aminoácidos polares con cargas netas positivas y negativas que contribuyen a la eliminación de partículas coloidales (Caldera, et al., 2007). Los aminoácidos polares presentes son del tipo aniónico (glutámico y aspártico) y catiónico (histidina, arginina y lisina), dichos aminoácidos interactúan con las partículas coloidales atrapándolas (Campos et al., 2003).

FIGURA 2.6. SEMILLAS DE *Moringa oleifera*



ELABORACIÓN: López, 2018

Diversos estudios han demostrado la importancia del tratamiento de aguas a partir de la extracción del compuesto activo del cotiledón de la semilla, de las cáscaras y sus vainas por sus características como bioadsorbente (Losada et al., 2015). Los tratamientos de agua en donde se han reportado el uso de *Moringa oleifera* (MO), se exponen a continuación.

2.4.1.1 ABLANDAMIENTO DE AGUAS

La presencia de un alto de contenido de sales en el agua causa incrustaciones de las tuberías de aguas y afecta la capacidad de limpieza de jabón provocando inconvenientes a nivel doméstico e industrial. El extracto de las semillas de *Moringa oleifera* remueven iones metálicos como el calcio, magnesio y otros cationes divalentes a través de adsorción de los iones solubles y su posterior precipitación (Arguello, 2015).

2.4.1.2 COAGULANTE NATURAL

Las semillas de *Moringa oleifera* tienen propiedades coagulantes y han sido comparadas con el sulfato de aluminio, debido a la presencia de proteínas catiónicas solubles (Gómez, 2013). Así pues, las semillas poseen una proteína, que cuando es solubilizada en agua es capaz de promover la coagulación y floculación de compuestos que remueven el color y turbidez de aguas altamente turbias con una eficiencia de remoción de sólidos superior al 90% (FAO, 1996). Varios estudios han demostrado también su efectiva capacidad antimicrobiana, contribuyendo de esa forma a un agua de buena calidad a un bajo costo (Masquetti, 2012).

Las ventajas de utilizar las semillas de *Moringa oleifera* como bioadsorbente para el tratamiento de aguas de consumo es que la alcalinidad del agua no se ve afectada, debido a que no hay ninguna influencia con los niveles del pH (Núñez, 2007). Asimismo no es necesario la extracción de las grasas o aceites vegetales y se puede utilizar las semillas lo que es una excelente alternativa para el tratamiento de aguas en zonas rurales (Feria, 2014). De igual manera para la remoción de compuestos tales como el lauril sulfato de sodio se obtienen eliminaciones en un 80 % en soluciones acuosas (Villareal y Ortega, 2014).

A nivel de la eliminación de nutrientes como el fósforo en aguas residuales, estudios previos sugieren que este medio filtrante tiene la capacidad de adsorber fosfatos con eficacias cercanas al 77% (Subha et al, 2015; Antov et al, 2010).

2.4.1.3 ADSORCIÓN DE METALES PESADOS Y NUTRIENTES

Las cáscaras de las semillas de *Moringa oleifera* han sido estudiadas en la remoción de metales pesados como: níquel, cobre y cadmio con valores de eliminación del 80, 96 y 95% respectivamente (Meneghel et al, 2013; García et al, 2014). Las vainas de *Moringa oleifera* han tratado cromo hexavalente, manganeso (II) y fluoruros con eficiencias del 77, 97 y 76%, respectivamente (Rodríguez et al, 2015; Parlikar & Mokashi, 2013).

En resumen, es notorio el alto potencial que tiene la planta de *Moringa oleifera* como proveedor de diferentes productos. No obstante, su aplicación para el tratamiento de aguas con semillas *Moringa oleifera* no ha sido explotada totalmente, de manera que el presente estudio busca contribuir con la investigación de la semilla de *Moringa oleifera* y la remoción de fluoruros, así se propone una nueva alternativa de tecnología para el tratamiento de agua subterránea

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1. SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS SEMILLAS DE *Moringa oleifera*

Las semillas de *Moringa oleifera* fueron recolectadas en la finca “El Ciruelo” ubicada en la parroquia Palmales del cantón Arenillas, provincia de El Oro. Se retiró manualmente las cáscaras del cotiledón como se muestra en la Figura 3.1.

FIGURA 3.1. CÁSCARAS Y COTILEDÓN DE *Moringa oleifera*



ELABORACIÓN: López, 2018

3.1.1. PREPARACIÓN DE LAS CÁSCARAS DE SEMILLAS DE *Moringa oleifera*

Las cáscaras de *Moringa oleifera* fueron sometidas a un tratamiento físico siguiendo la metodología descrita por Parlikar y Mokashi (2013). En primer lugar, se sometió a un proceso de lavado para eliminar compuestos solubles que pueden estar presentes y pueden interferir en la calidad de agua tratada. El proceso consistió en colocar 40 g de cáscara en contacto con 400 mL de NaOH 0.5 N durante 10 minutos, transcurrido ese tiempo se filtraron y se lavaron las cáscaras con agua desionizada hasta que el agua se vuelva incolora.

Una vez terminado el ciclo de lavado se deja secar el material obtenido, en una estufa a 105°C por 12 horas. A continuación, se sometió a un proceso de triturado utilizando un molino casero, se tamizó a través de tamices N° 25, N°50 y N° 70, con el fin de obtener partículas de tamaños de 0.71 mm, 0.30 mm y 0.21 mm respectivamente. Finalmente se almacenó en un desecador para prevenir la adsorción de humedad antes de su uso.

3.1.2 PREPARACIÓN DEL COTILEDÓN DE LAS SEMILLAS DE *Moringa oleifera*

La preparación del cotiledón de las semillas de *Moringa oleifera* fueron tratadas por la metodología de Junior et al. (2013) modificándola para facilitar el proceso. El cotiledón fue sometido a un proceso de triturado a través de un molino casero, posteriormente se secaron en una estufa a 60 °C por 36 horas y finalmente fueron tamizados a través de tamices N° 25, N° 50 y N° 70, con el fin de obtener partículas de tamaños 0.71 mm, 0.30 mm y 0.21 mm respectivamente. Finalmente se almacenó en un desecador para prevenir la adsorción de humedad antes de su uso.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS SEMILLAS DE *Moringa oleifera*

3.2.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA

Se determinó las características de las partes de la semilla de *Moringa oleifera* mediante: el pH y humedad con los procedimientos establecidos en la norma ASTM D-2216 (American Society of Testing Materials, sf). En la Tabla 3.1 se presentan los métodos y equipos empleados en la caracterización.

TABLA 3.1. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICAS DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera*

| Parámetro | Método | Instrumentos |
|-----------|---------------------------------|---|
| pH | Potenciométrico | pH-metro |
| | APHA 4500- H ⁺ pH | Marca: Thermo Scientific Modelo Orion 5 Star |
| Humedad | Gravimétrico | Marca: Lindberg/ Blue. Balanza analítica. |
| | ASTM D-2216 | Marca: Denver Instrument. Modelo: M-220D |

ELABORACIÓN: López, 2018

El porcentaje de lignina, hemicelulosa y celulosa presente en las cáscaras de *Moringa oleifera*, se determinó mediante los procedimientos establecidos en las normas ASTM D1106-96, D1109-84, D1109-84 respectivamente (American Society of Testing Materials, sf).

3.2.2. MORFOLOGÍA

Para determinar la morfología de los adsorbentes, se utilizó un microscopio electrónico de barrido de marca ASPEX, modelo PSEM Express con un valor de potencial de 20.0 kV y una presión de $2,7 \times 10^{-5}$ torr. Este instrumento está ubicado en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

3.2.3. MICROESTRUCTURA

Los análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se realizaron con un espectrómetro marca Perkin Elmer, modelo Spectrum 100. Los análisis de espectroscopía Raman se realizaron usando un equipo HORIBA

Scientific LabRam Evolution, con un láser de longitud de onda de 633 nm. Estos equipos pertenecen al LANUM.

3.2.4. CARGA SUPERFICIAL

La metodología empleada en este estudio es descrita por Nezamzadeh-Ejhieh y Kabiri-Samani, (2013), cuyo objetivo es caracterizar la superficie del bioadsorbente a través del punto de carga cero (pH_{PCC}). Se añadieron 0.1 g del adsorbente en alícuotas de 50 mL de NaCl 0.01 M bajo condiciones diferentes de pH inicial (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10), el pH se reguló mediante la adición de NaOH o HCl 0.01 M. Estos matraces se mantuvieron en agitación durante 24 h y posteriormente se midió el pH final usando un medidor de pH. Finalmente, el punto de carga cero se encontró a partir de un gráfico de pH final vs. el pH inicial.

3.3 PROCESO DE BIOADSORCIÓN

3.3.1 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE FLUORURO

A partir de una solución madre de 100 mg F/L, se prepararon soluciones de concentración de 9 y 4 mg/L. A continuación, se ajustó su pH a 6 con una solución de 0.01 M de HNO_3 y 0.01 M de NaOH.

3.3.2 OPERACIÓN DE REACTORES BATCH

Los ensayos de bioadsorción se realizaron mediante una serie de experimentos en batch, utilizando un equipo de prueba de jarras modelo 7790-901B. Para el experimento realizado se tuvo en cuenta el efecto de tres variables:

- El tamaño de partícula
- Cantidad de adsorbente
- Concentración inicial de flúor

De esta manera se puede observar en la Tabla 3.1 los ensayos empleados.

TABLA 3.2. ENSAYOS BATCH

| Ensayo | Tamaño (mm) | Cantidad de adsorbente (g) | Concentración inicial de flúor (mg/L) |
|--------|-------------|----------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 0.71 | 1, 2, 3, 4, 5 | 9 |
| 2 | 0.71 | 1, 2, 3, 4, 5 | 4 |
| 3 | 0.3 | 1, 2, 3, 4, 5 | 9 |
| 4 | 0.3 | 1, 2, 3, 4, 5 | 4 |
| 5 | 0.21 | 1, 2, 3, 4, 5 | 9 |
| 6 | 0.21 | 1, 2, 3, 4, 5 | 4 |

ELABORACIÓN: López, 2018

Para los estudios de biosorción se transfirió 1, 2, 3, 4, y 5 g del adsorbente, a un vaso de precipitación de 1000 mL junto con 600 mL de solución de fluoruro de potasio con las diferentes concentraciones establecidas y se agitó a 100 rpm hasta llegar al punto de equilibrio. Se tomaron alícuotas de 5 mL en intervalos de 20 minutos, cada ensayo se realizó por duplicado.

FIGURA 3.2 PROCESO DE ADSORCIÓN



ELABORACIÓN: López, 2018

3.3.3 DETERMINACIÓN DE FLUORURO

La determinación de F^- en las soluciones, se realizó mediante el método colorimétrico, APHA 4500-F G, que consistió en tomar 2 mL de reactivo SPANDS y colocarlos en 10 mL de una dilución 1:10 de la alícuota tomada, y posteriormente se midió en un espectrofotómetro HACH modelo DR 2800 a una longitud de onda de 580 nm.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS SEMILLAS DE *Moringa oleifera*

4.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA

4.1.1.1. POTENCIAL HIDRÓGENO (pH)

En la Tabla 4.1 se puede observar los diferentes resultados obtenidos de pH del material en la muestra, a diferentes tamaños de partícula del adsorbente. El potencial hidrógeno es un indicador de número de iones libres de hidrógeno o hidroxilos en una sustancia, indicando la acidez o alcalinidad de la misma (Garritz, 2005).

TABLA 4.1. pH DEL COTILEDÓN Y CÁSCARA DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera* A DISTINTOS TAMAÑOS DE PARTÍCULA

| Partes de la semilla de <i>M. oleifera</i> | Tamaño de partícula (mm) | pH |
|--|--------------------------|------|
| Cotiledón | 0.71 | 6.87 |
| | 0.30 | 6.36 |
| | 0.21 | 6.12 |
| Cáscara | 0.71 | 9.09 |
| | 0.30 | 9.44 |
| | 0.21 | 9.69 |

ELABORACIÓN: López, 2018

Para el caso del cotiledón de *M. oleifera*, su tamaño afecta a su pH disminuyendo a razón de 0.51 por cada 0.41 mm de la muestra. Sin embargo, se puede observar

que el cotiledón no altera significativamente el pH y la alcalinidad del agua después del tratamiento (Masquetti, 2013).

Mientras tanto, las cáscaras de MO, su tamaño afecta en su pH aumentando a razón de 0.35 por cada 0.41 mm de la muestra, para el caso de la cáscara el pH de la muestra es de carácter básico debido a al lavado alcalino que sufrió el material ocasionando un aumento de la concentración de iones hidroxilo en la solución (Parlikar & Mokashi, 2013).

4.1.1.2 PORCENTAJE DE HUMEDAD

La Tabla 4.2 muestra los porcentajes de humedad obtenidos del cotiledón y cáscara de MO.

TABLA 4.2. PORCENTAJE DE HUMEDAD DEL COTILEDÓN Y CÁSCARA DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera*

| Partes de la semilla de <i>M. oleifera</i> | Peso en seco (g) | % humedad |
|--|------------------|-----------|
| Cotiledón | 0.99 | 3.98 |
| Cáscaras | 1.02 | 9.70 |

ELABORACIÓN: López, 2018

El porcentaje de humedad de los materiales utilizados fue de 3.98% y 9.70 %, para el cotiledón y cáscara de *M. oleifera*, respectivamente. Estos valores indican que los materiales utilizados tienen una baja humedad (Vega, 2017).

Por tanto, se podría concluir que en el material existe bajo riesgo de contaminación por hongos y bacterias debido a que por encima del 14% existe presencia de estos organismos (Gómez, 2013).

4.1.1.3. CONTENIDO DE LIGNINA, HOLOCELULOSA Y CELULOSA

La cáscara de *Moringa oleifera* presenta un 23.07% de lignina. Este porcentaje de lignina presente en las cáscaras apunta a su aprovechamiento como adsorbente debido a la presencia de grupos carboxílicos ionizables (Asimbaya, 2016). El alto porcentaje de contenido de lignina muestran que la planta tiene una alta rigidez y consistencia (Chiluiza y Hernández, 2009).

El porcentaje de celulosa y hemicelulosa del material son de 44.49 y 19.06 respectivamente. La holocelulosa es el compuesto conformado por la celulosa y hemicelulosa. Dicho valor de holocelulosa muestra un porcentaje alto de carbohidratos (Asimbaya, 2016; AIDER, 2013).

Los valores de lignina y celulosa están entre los rangos más comúnmente encontrados en la composición de la madera, que son: celulosa: 38-50% y lignina 15-25% (Chávez y Domine, 2013). Por consiguiente, los valores obtenidos de lignina y celulosa muestran a que las cáscaras de *Moringa oleifera* corresponden a valores típicos de maderas duras (Montaño, 2014).

**TABLA 4.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS CÁSCARAS DE
*Moringa oleifera***

| Constituyentes | Porcentaje (%) |
|----------------|----------------|
| Lignina | 23.07 |
| Celulosa | 44.49 |
| Hemicelulosa | 19.06 |

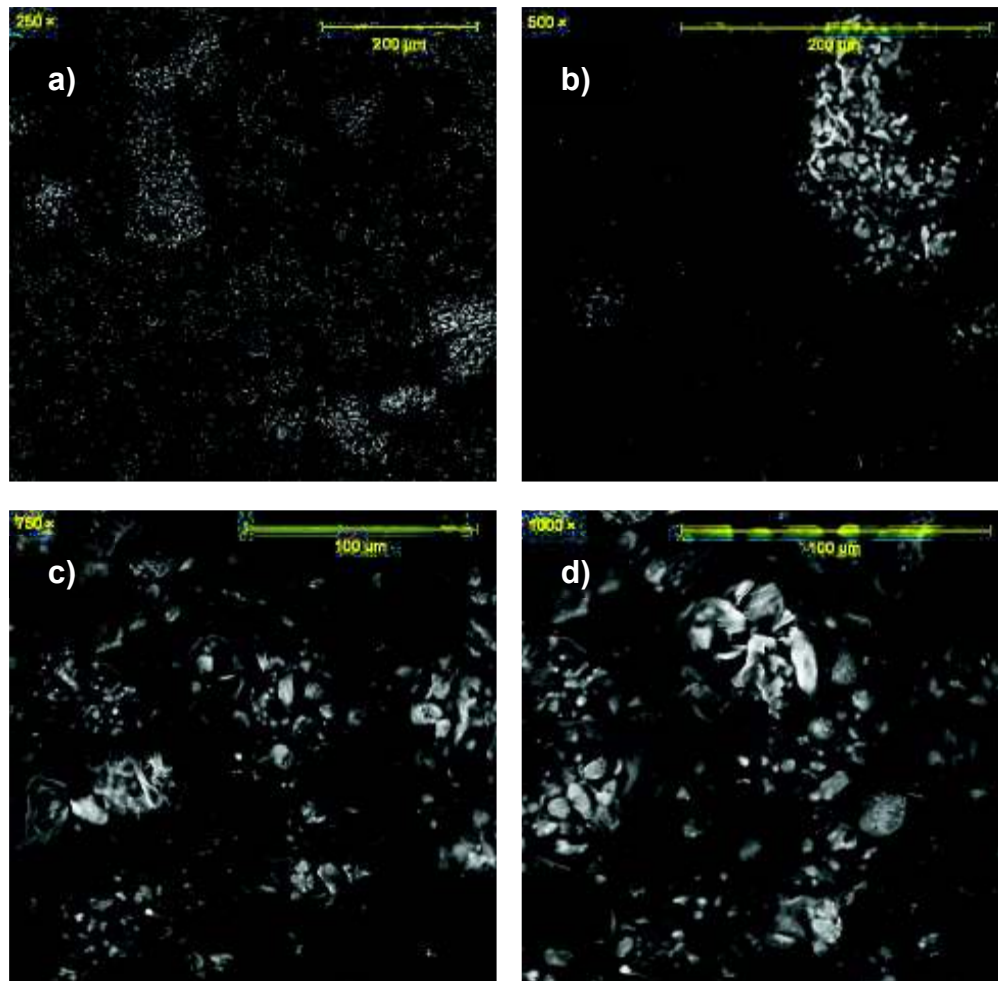
ELABORACIÓN: López, 2018

4.1.2. MORFOLOGÍA

Las Figuras 4.1 (a), (b), (c) y (d) muestran las imágenes SEM de la superficie del

cotiledón de la semilla de *M. oleifera*, a una magnificación de 250x, 500x, 750x y 1000x, respectivamente.

FIGURA 4.1. IMÁGENES SEM DEL COTILEDÓN DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera*

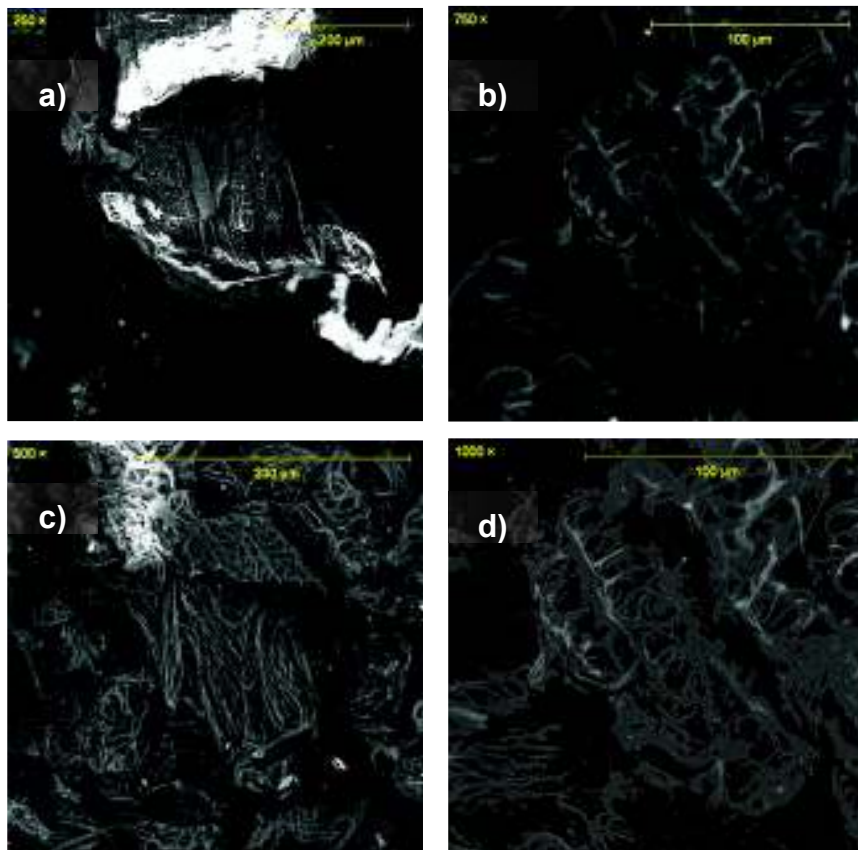


ELABORACIÓN: López, 2018

Se puede observar una morfología granular e irregular, los espacios disponibles facilitan el proceso de adsorción debido a que proporcionan un área de superficie interna alta (Queiroz, 2015). Esta estructura facilita la adsorción iónica debido a los intersticios, y más importante aún, la presencia del componente proteico de la semilla (Meneghel et al., 2013; Reck et al, 2018).

Los resultados de la Figura 4.2 (a), (b), (c) y (d) muestran las superficies de la cáscara de la semilla de *M. oleifera*, a una magnificación de 250x, 500x, 750x y 1000x respectivamente. Se puede observar en la Figura 4.2 (a) una superficie con aspecto fibroso con áreas esponjosas y una estructura irregular con pocos poros. Por otra parte, las Figuras 4.2 (b), (c) y (d) revelan la presencia de una estructura heterogénea con algunas deformaciones sobre la superficie, conteniendo sitios disponibles de lo cual se puede inferir que este material provee las condiciones para la adsorción de iones en los intersticios (Pollard, 1995; Reck et al, 2018).

FIGURA 4.2. IMÁGENES SEM DE LAS CÁSCARAS DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera*

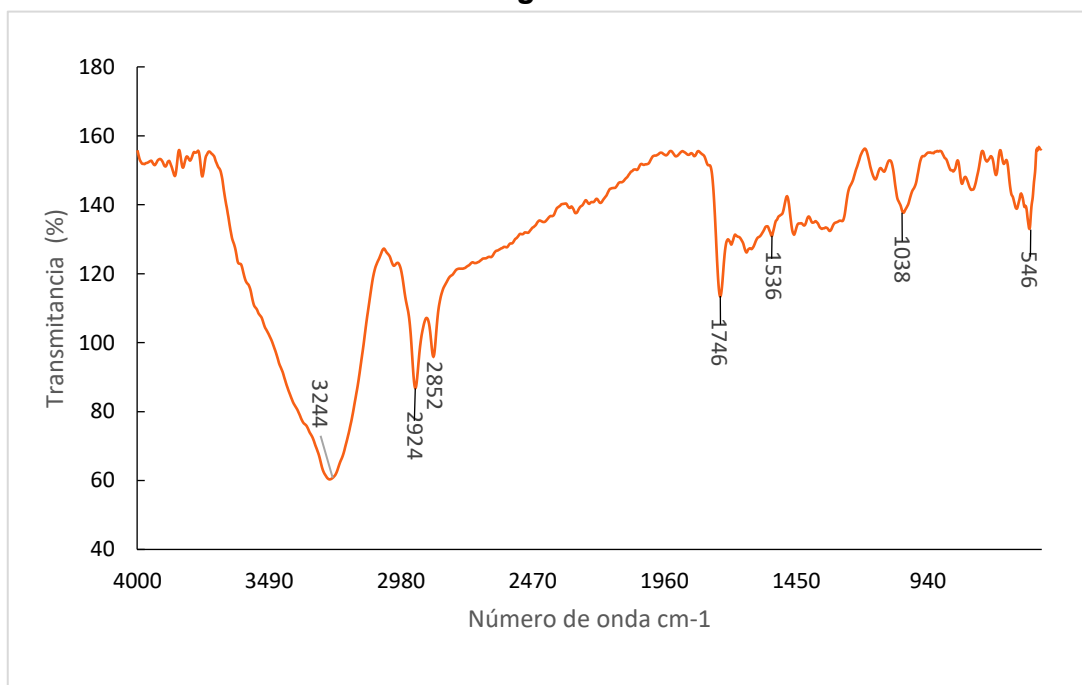


ELABORACIÓN: López, 2018

4.1.3. MICROESTRUCTURA

La técnica FTIR fue utilizada para evaluar cualitativamente los grupos funcionales de la semilla de *Moringa oleifera*. La Figuras 4.3 y 4.4 muestra los espectros obtenidos de las diferentes partes de la semilla.

FIGURA 4.3. ESPECTRO FTIR DEL COTILEDÓN DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera*

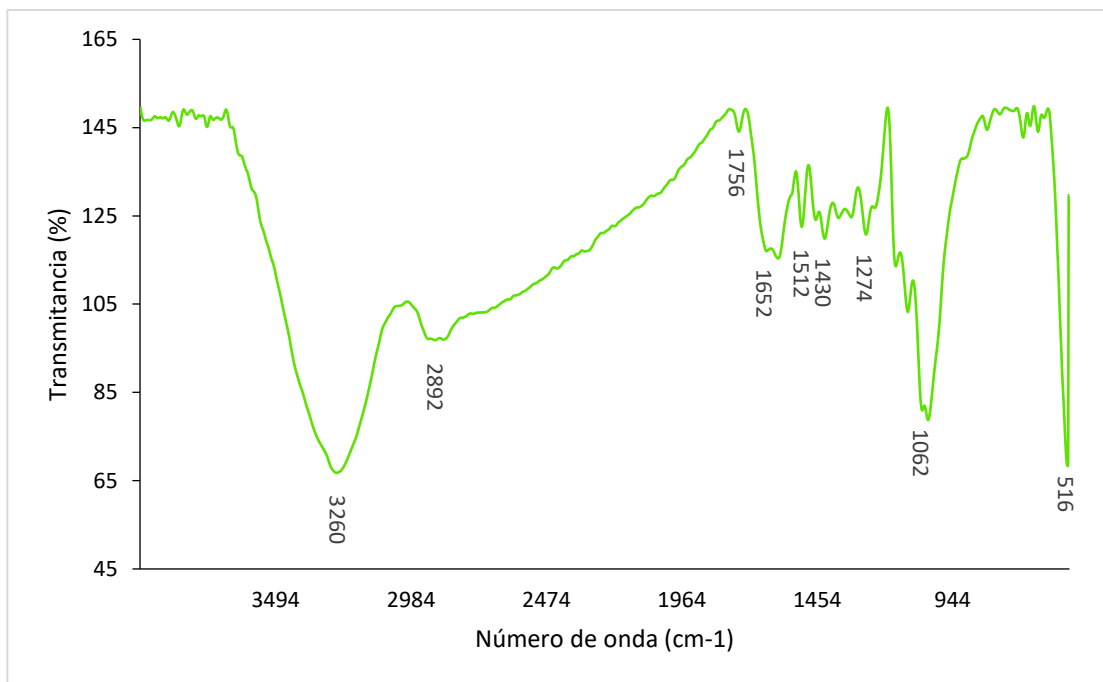


ELABORACIÓN: López, 2018

El espectro FTIR ilustrado en la Figura 4.3 apunta a los principales grupos funcionales del cotiledón de la semilla de *Moringa oleifera*. La banda en 3244 se atribuye al estiramiento de enlaces de aminas, y al estiramiento de enlaces OH de alcoholes en conexión con el hidrógeno, debido al alto contenido de proteínas y ácidos grasos presentes en el cotiledón (Lara, et al., 2016). Las bandas situadas en 2954 y 2852 cm^{-1} están relacionadas con el estiramiento asimétrico de la unión CH de grupos CH_3 y CH_2 respectivamente atribuidos al contenido de proteínas del cotiledón (Rojo, 2013). En la región de 1746 y 1536 cm^{-1} se observa un conjunto de picos debido al estiramiento del enlace $\text{C}=\text{O}$ debido a la presencia de grupo carbonilo que forma parte de los ácidos grasos y de las aminas de la porción

proteica (Queiroz, 2015). Las bandas en 1038 cm^{-1} pertenecen a la vibración C–OH de alcohol secundario (Rojo, 2013).

FIGURA 4.4. ESPECTRO FTIR DE LA CÁSCARA DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera*

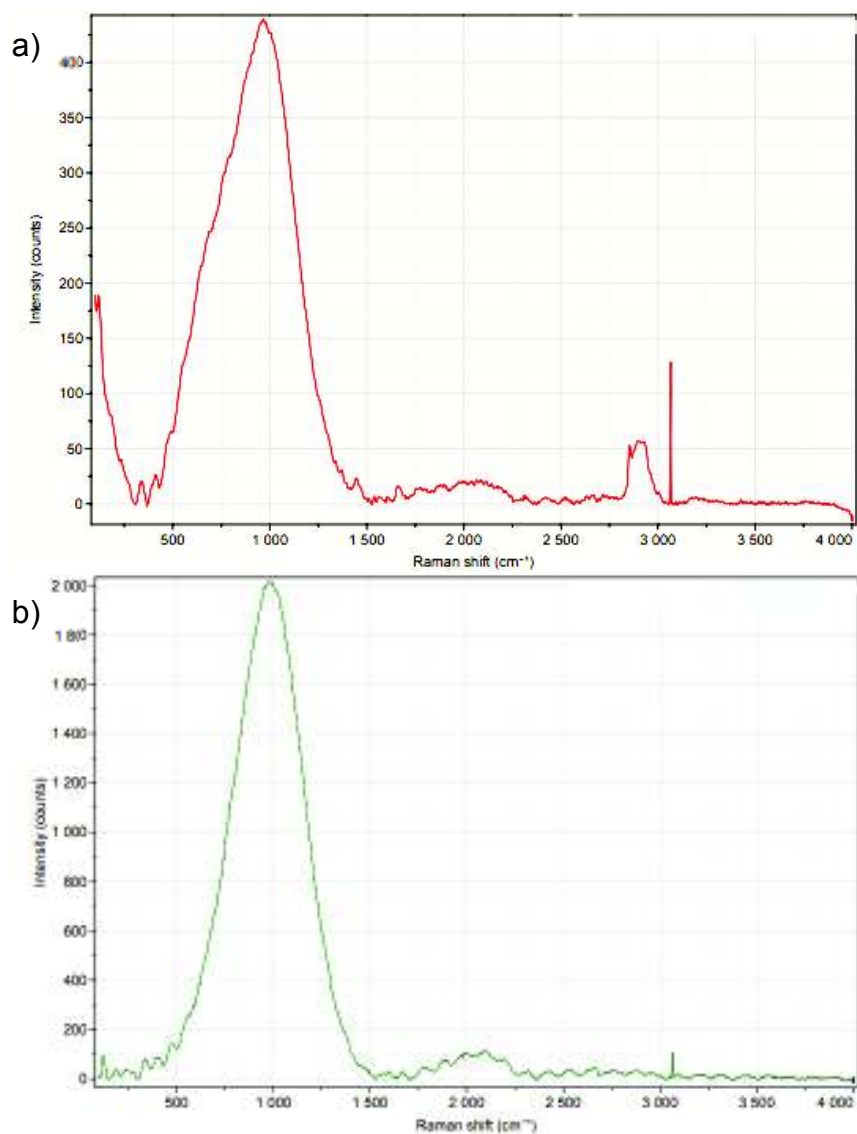


ELABORACIÓN: López, 2018

La Figura 4.4 muestra las bandas más significativas obtenidas en el espectro de la cáscara de la semilla de *M. oleifera*. El espectro FTIR mostró una banda intensa a 3268 cm^{-1} que indica la presencia de enlaces O–H en carbohidratos, unidades de lignina, celulosa y agua adsorbida (Alves, Borgues et Coelho., 2011). La banda a 2902 cm^{-1} se debe a las vibraciones del enlace C–H de las cadenas alifáticas (Asimbaya, 2016). Las bandas que aparecen en 1756 corresponden al grupo carbonilo C=O, representativo de la holocelulosa (Kumar, et al., 2010). Se atribuye las bandas 1652-1430 a la vibración del estiramiento del enlace C–O presentes en grupos de amidas y carboxilos respectivamente (Meneghel et al., 2013). Las bandas de 1652 a 1062 representa la huella digital de la lignina y celulosa (Asimbaya, 2016).

La Figura 4.5 muestra el espectro Raman (a) del cotiledón y (b) de las cáscaras de *Moringa oleifera*. En la Figura 4.5.a se aprecia una banda en la longitud de onda 1000 cm^{-1} de baja intensidad en comparación con la Figura 4.5.b. Esta longitud de onda está asociado al grupo funcional C-O, lo que corrobora la presencia de este grupo funcional por la técnica FTIR (Ávila et al, 2012). De igual manera, se puede confirmar la presencia de grupos C-H por las cadenas alifáticas debido al pico en la banda 2800 y 3100 en la Figura 4.5.a (UNAM, 2012).

FIGURA 4.5. ESPECTRO RAMAN DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera*



ELABORACIÓN: López, 2018

4.1.4. CARGA SUPERFICIAL

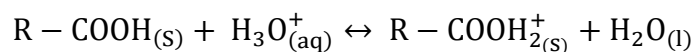
En el proceso de adsorción, el pH es uno de los parámetros más importantes que afecta a este proceso. Esto se debe a que existe una dependencia estrechamente relacionada con las propiedades ácido-base de los grupos funcionales presentes en la superficie del adsorbente (Rodríguez, 2015).

La Figura 4.6 muestra el análisis del punto de carga cero (pH_{PCC}) obtenidos para los distintos adsorbentes. El punto de carga cero es el valor de pH donde la carga neta del adsorbente es cero, indica la tendencia de una superficie a tener carga positiva o negativa dependiendo del pH.

En la Figura 4.6 (a) se puede observar que para el cotiledón, a un pH 6.23 el punto de carga es cero, mientras que para las cáscaras el punto de carga cero es a un pH 7.24 como se muestra en la Figura 4.6 (b). Por debajo de estos valores de pH la carga superficial es positiva y la adsorción será favorecida para aniones. Así mismo, a valores superiores del punto de carga cero, la carga de la superficie es negativa y favorece la adsorción de cationes (Rodríguez, 2015).

Para estos casos, los grupos funcionales no estarán disociados, y los grupos amino de los aminoácidos estarán protonados. En estas condiciones el adsorbente atrae principalmente aniones, como puede verse en las siguientes reacciones (Queiroz, 2015):

- Protonación del grupo carboxilo



- Protonación del grupo amina:

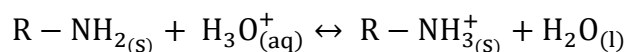
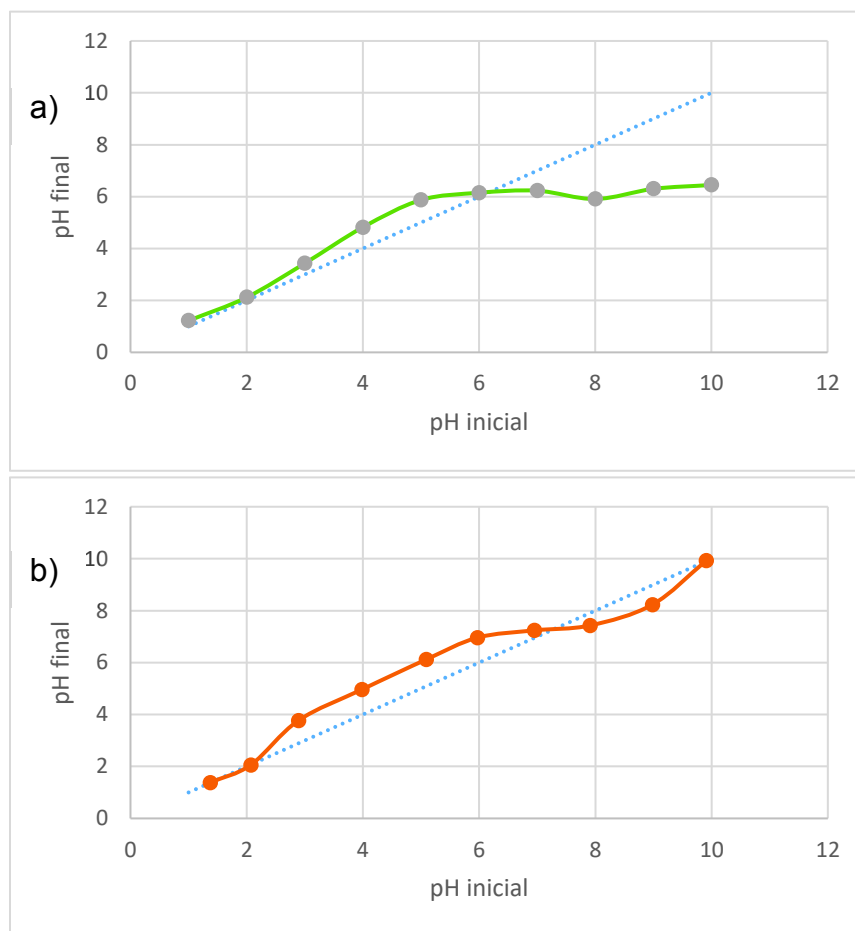


FIGURA 4.6. PUNTO DE CARGA CERO DEL COTILEDÓN Y CÁSCARA DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera*



ELABORACIÓN: López, 2018

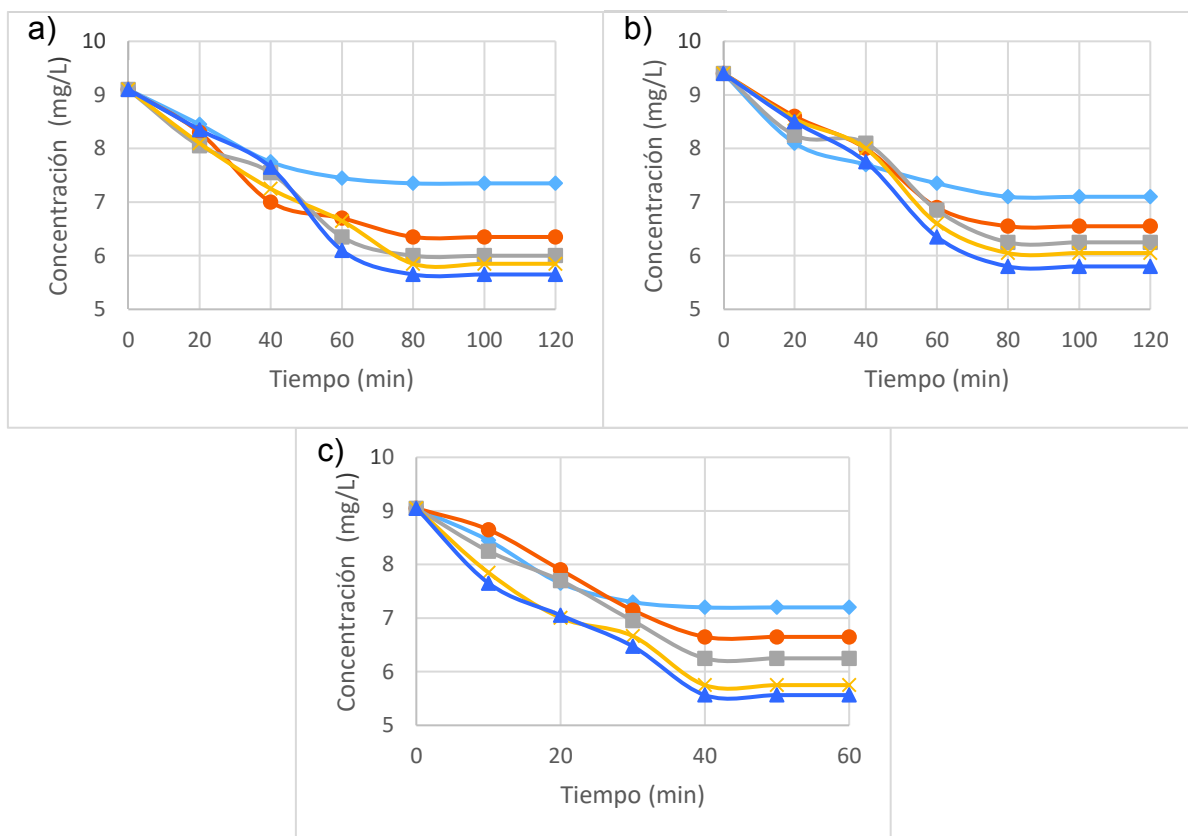
4.2. PROCESO DE BIOADSORCIÓN

4.2.1. TIEMPO DE EQUILIBRIO DE ADSORCIÓN

El estudio cinético de adsorción se puede establecer a partir de la representación de la variación de concentración de flúor en la disolución a lo largo del tiempo como se muestra en las Figuras 4.7 y 4.8. Las condiciones en las que se trabajaron los ensayos batch fueron: temperatura ambiente, un volumen de 600 mL, concentración inicial de fluoruros de 9 mg/L, pH= 6 y agitación constante de 100 rpm.

En las Figuras 4.7 y 4.8 se puede apreciar que durante los primeros 60 minutos existe una elevada tasa de adsorción para los tamaños de 0.71 y 0.30 mm, mientras que para el tamaño de partícula de 0.21 mm la elevada tasa de adsorción ocurre en los primeros 40 min. Esto ocurre ya que al inicio del ensayo existe una gran cantidad de sitios activos vacantes en estos adsorbentes. Por lo tanto, una gran cantidad de iones fluoruro se unen rápidamente al adsorbente, al pasar el tiempo la mayoría de sitios activos están ocupados por iones fluoruros y se dificulta que sean ocupados por estos iones debido a las fuerzas de repulsión que existe entre la superficie del adsorbato y la fase líquida (Bhaumik y Mondal, 2015)

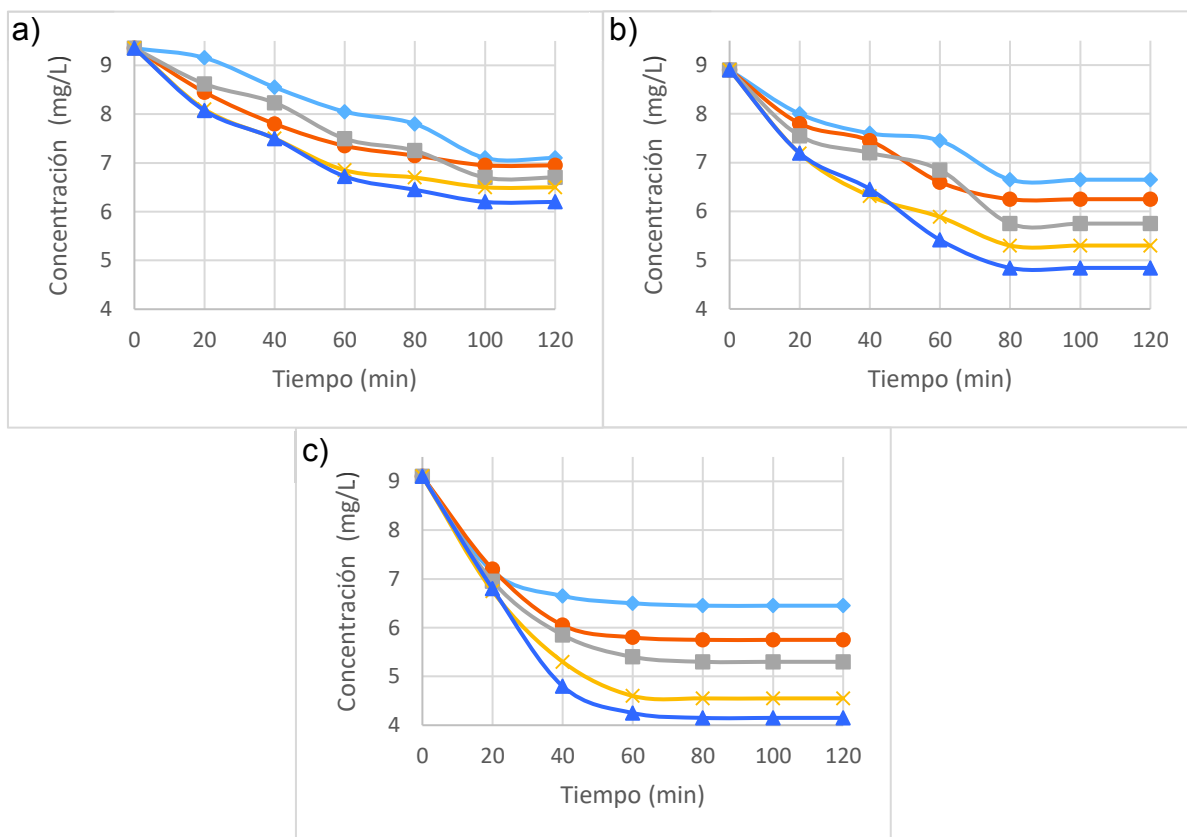
FIGURA 4.7. TIEMPO DE EQUILIBRIO DEL COTILEDÓN DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera* COMO ADSORBENTE EN SOLUCIÓN DE FLUORUROS



a) Tamaño de partícula 0.71 mm, b) Tamaño de partícula 0.3 mm, c) Tamaño de partícula 0.212 mm. $M_{\text{sólido}} =$ ◆ 0.6 g ● 1.2 g ■ 1.8 g ✕ 2.4 g ▲ 3.0 g

ELABORACIÓN: López, 2018

FIGURA 4.8. TIEMPO DE EQUILIBRIO DE LA CÁSCARA DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera* COMO ADSORBENTE EN SOLUCIÓN DE FLUORUROS



a) Tamaño de partícula 0.71 mm, b) Tamaño de partícula 0.3 mm, c) Tamaño de partícula 0.21 mm. $M_{\text{sólido}} =$ —●— 0.6 g —●— 1.2 g —■— 1.8 g —×— 2.4 g —▲— 3.0 g

ELABORACIÓN: López, 2018

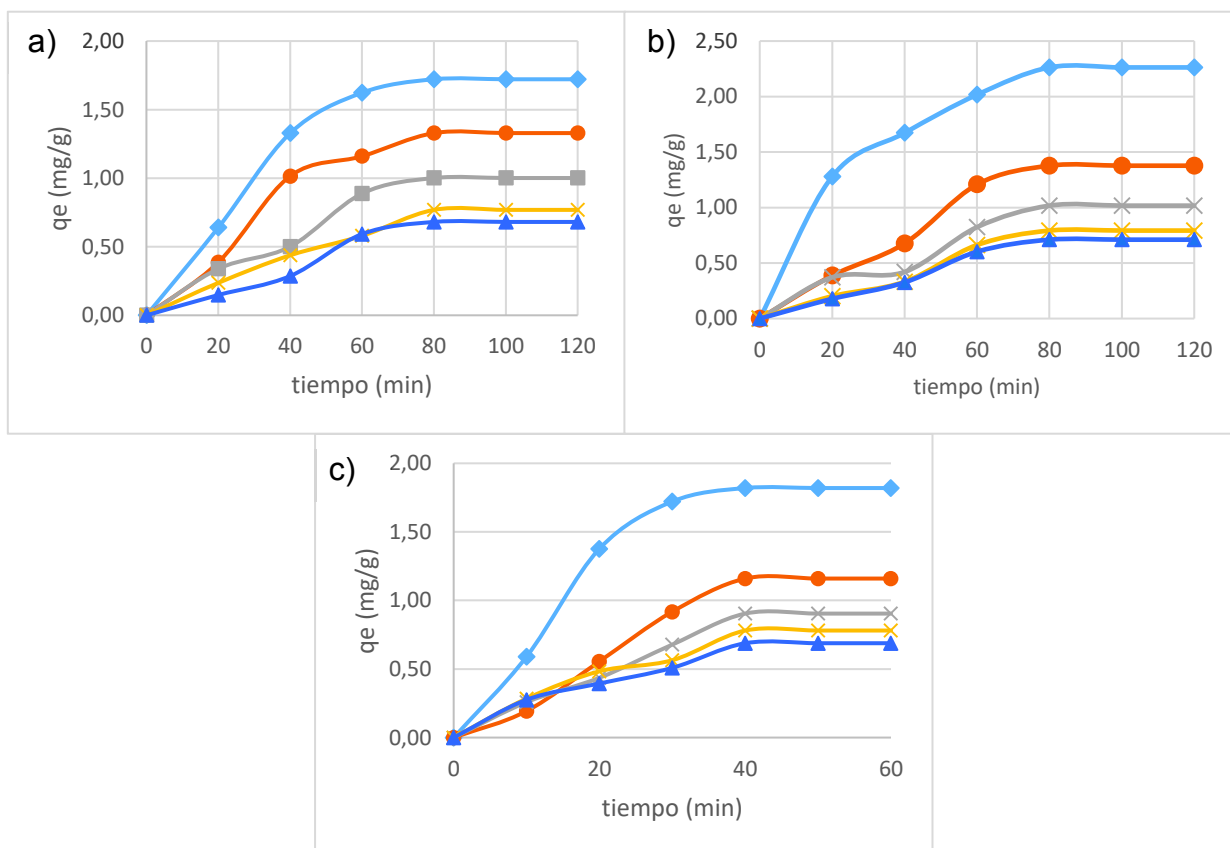
El tiempo de equilibrio para la adsorción de flúor empleando bioadsorbentes es alrededor de las dos primeras horas, Vivek & Karthikeyan (2011) emplearon la cascarilla de arroz para la remoción de flúor y establecieron que el tiempo óptimo de contacto es de 120 minutos, lo mismo ocurre al utilizar la fibra de coco (Bhaumik y Mondal, 2015). Vega (2017) concluye que el tiempo de equilibrio para la remoción de fluoruros mediante la cáscara de huevo es de 100 min, lo que coincide al emplear semillas de guaba (Valencia et al, 2012).

No obstante, el tiempo de equilibrio de adsorción de metales pesados y fosfatos utilizando las cáscaras de las semillas de *Moringa oleifera* es de 60 y 90 minutos

respectivamente, mientras que cuando se utiliza el cotiledón el tiempo de equilibrio registrado es de 20 y 60 minutos (Kumar et al., 2011; Lagos, 2017; Subha et al, 2015; Silva et al., 2011). Por lo tanto, el tiempo de equilibrio obtenido en este estudio, 40 minutos para el cotiledón de *Moringa oleifera* y 60 minutos para las cáscaras de *Moringa oleifera* con un tamaño de partícula de 0.21 mm, se ajusta a estudios anteriores.

En las Figuras 4.9 y 4.10 se puede observar los resultados obtenidos en cuanto a la capacidad de adsorción de flúor sobre el cotiledón y cáscaras de la semilla de *M. oleifera*.

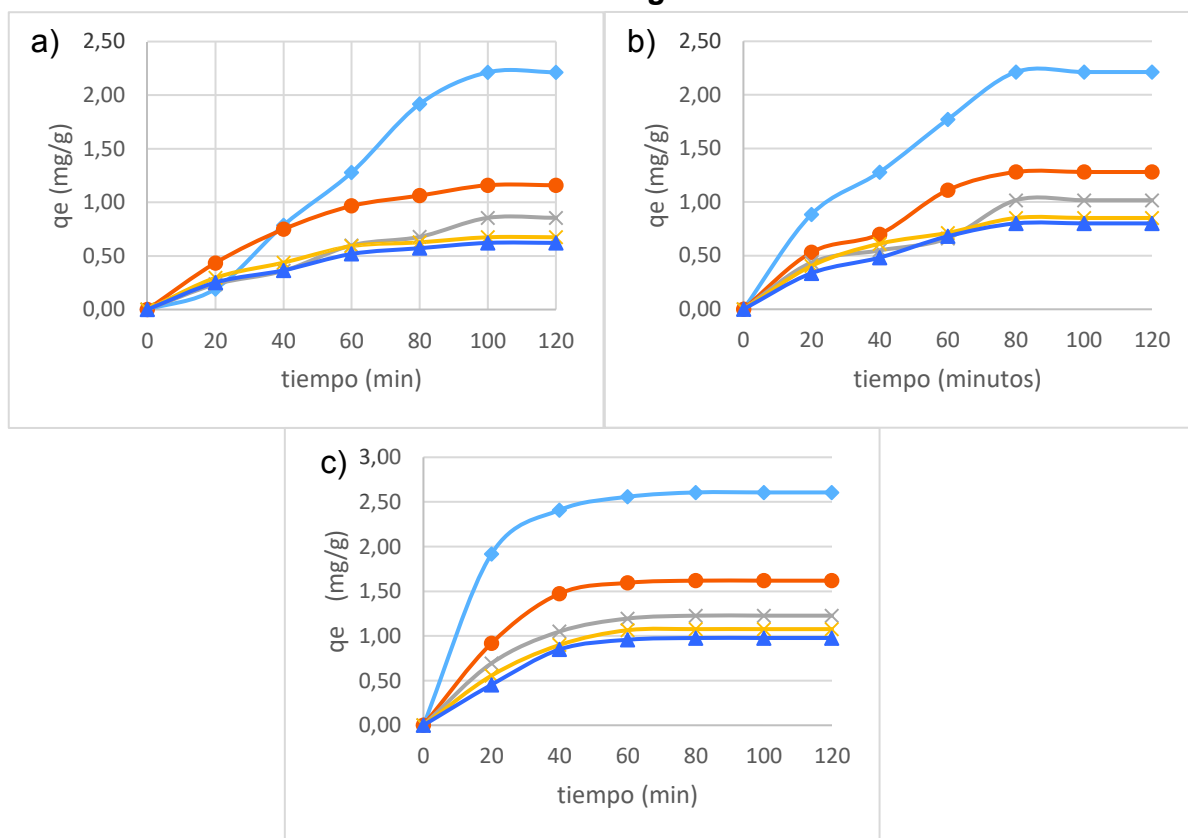
FIGURA 4.9. CANTIDAD DE FLÚOR ADSORBIDO (mg/g) DE COTILEDÓN DE SEMILLA DE *Moringa oleifera*



a) Tamaño de partícula 0.71 mm, b) Tamaño de partícula 0.3 mm, c) Tamaño de partícula 0.21 mm. $M_{\text{sólido}} =$ —◆— 0.6 g —●— 1.2 g —■— 1.8 g —×— 2.4 g —▲— 3.0 g

ELABORACIÓN: López, 2018

FIGURA 4.10. CANTIDAD DE FLÚOR ADSORBIDO (mg/g) DE COTILEDÓN DE SEMILLA DE *Moringa oleifera*



a) Tamaño de partícula 0.71 mm, b) Tamaño de partícula 0.3 mm, c) Tamaño de partícula 0.21 mm. $M_{\text{sólido}} =$ —●— 0.6 g —●— 1.2 g —■— 1.8 g —×— 2.4 g —▲— 3.0 g

ELABORACIÓN: López, 2018

En cuanto a la influencia de los diferentes tamaños de partícula, cuando la cantidad de adsorbente empleada es mayor, las cantidades finales de flúor adsorbido por el material son mayores. Esto se debe a que existe una mayor cantidad de área superficial disponible donde se puede llevar a cabo el proceso de adsorción (García, 2010).

Como se puede observar en la Figura 4.9 y 4.10, la cantidad de flúor adsorbido por gramo de cáscara, es superior a la cantidad adsorbida por gramo del cotiledón en todos los ensayos. Una vez alcanzado el estado estacionario, la concentración de flúor, presente en la disolución de la muestra de la cáscara, es menor que la

concentración de equilibrio en la muestra que lleva el cotiledón de *Moringa oleifera* como material adsorbente (Figura 4.7 y 4.8).

Puesto que la porosidad que tiene cada material afecta al proceso de adsorción, debido a que éste fenómeno se da fundamentalmente en el interior de las partículas sobre las paredes de los poros (Tejada et al., 2014). Al comparar las Figuras 4.1 y 4.2 se aprecia como la cáscara de *Moringa oleifera* tiene un mayor número de poros que el cotiledón de *Moringa oleifera*. Esto contribuye a aumentar el área específica del adsorbente; por consiguiente, retiene mayor cantidad de fluoruros (Queiroz, 2015).

En las Tablas 4.4 y 4.5 se muestran las eficiencias de eliminación de flúor alcanzadas en el tiempo de equilibrio.

TABLA 4.4. EFICIENCIA DE LA ELIMINACIÓN DE FLÚOR (%) PARA EL COTILEDÓN DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera*

| Tamaño de partícula (mm) | | 0.71 | | 0.30 | | 0.21 | |
|------------------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Concentración Inicial (mg/L) | | 9 | 4 | 9 | 4 | 9 | 4 |
| Cantidad de adsorbente (g) | 1 | 19.23% | 19.51% | 24.47% | 26.25% | 20.44% | 51.22% |
| | 2 | 30.22% | 34.15% | 30.32% | 42.50% | 26.52% | 63.41% |
| | 3 | 34.07% | 39.02% | 33.51% | 52.50% | 30.94% | 67.53% |
| | 4 | 35.71% | 45.12% | 35.64% | 56.25% | 36.46% | 71.43% |
| | 5 | 37.91% | 53.66% | 38.30% | 62.50% | 38.52% | 76.62% |

ELABORACIÓN: López, 2018

TABLA 4.5. EFICIENCIA DE LA ELIMINACIÓN DE FLÚOR (%) PARA LA CÁSCARA DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera*.

| Tamaño de partícula (mm) | 0.71 | 0.71 | 0.30 | 0.30 | 0.21 | 0.21 | |
|------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Concentración Inicial (mg/L) | 9 | 4 | 9 | 4 | 9 | 4 | |
| Cantidad de adsorbente (g) | 1 | 24.06% | 35.56% | 25,28% | 28.57% | 29.12% | 26.25% |
| | 2 | 25.67% | 42.22% | 29,78% | 38.96% | 36.81% | 48.78% |
| | 3 | 28.34% | 45.56% | 35,39% | 45.45% | 41.76% | 62.20% |
| | 4 | 30.48% | 48.89% | 40,45% | 54.55% | 50.00% | 74.39% |
| | 5 | 33.69% | 52.22% | 45,60% | 59.74% | 54.40% | 80.00% |

ELABORACIÓN: López, 2018

Se observa como los valores de eficiencia aumentan con los ensayos llevados a cabo con la mayor cantidad de adsorbente (5 g). Esto es debido a una mayor disponibilidad de superficie de contacto con el adsorbato y volumen del adsorbente aumentando así los grupos funcionales capaces de adsorber el ión fluoruro (Bhauik y Mondal, 2014)

La eficiencia de remoción de flúor por adsorción sobre un material, depende en gran medida del tamaño de partícula, aumentando su eficiencia a un 42.86% para el cotiledón de *M. oleifera* y un 53.20% para el caso de las cáscaras de *M. oleifera* a un tamaño de 0.21 mm. Esto se debe a que los sitios activos están más expuestos mientras más pequeño sea el tamaño de partícula, permitiendo que los adsorbatos entren en contacto fácilmente con estos sitios (Yean et al., 2005).

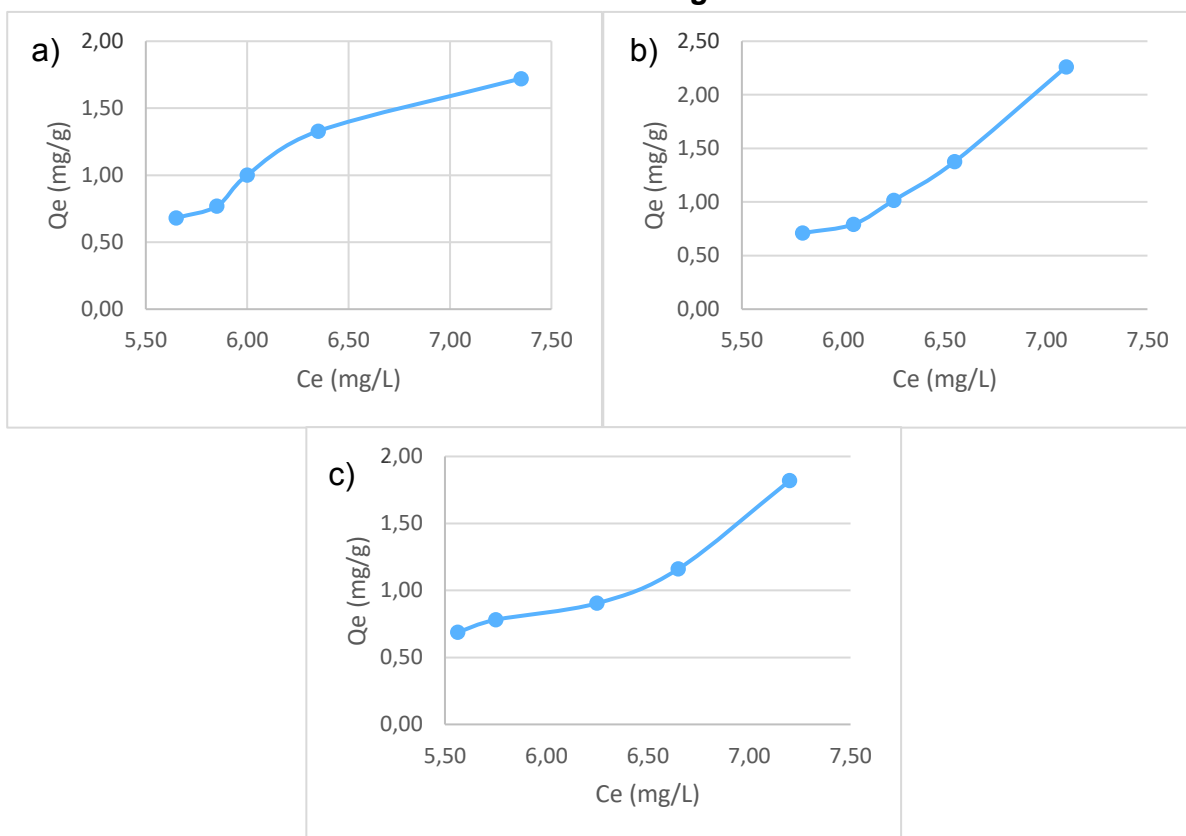
En las Tablas 4.4 y 4.5 se observa como la eficiencia de eliminación de flúor, aumenta a medida que disminuye la concentración inicial del mismo en cada una de las muestras. Esto se debe a que la capacidad de adsorción de los materiales se agota bruscamente con el aumento de la concentración inicial de flúor, debido

a que para una dosis de adsorbente, los sitios activos disponibles fueron limitados y saturados. Bhauik y Mondal (2014) reportaron casos similares para la remoción de flúor utilizando cáscara de plátano.

4.2.2. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

En base a los valores obtenidos de concentración y cantidad de flúor adsorbido en el equilibrio, se diseñaron las isotermas de adsorción empleando los modelos de Langmuir y Freundlich, las mismas que se muestran en las figuras 4.11 y 4.12.

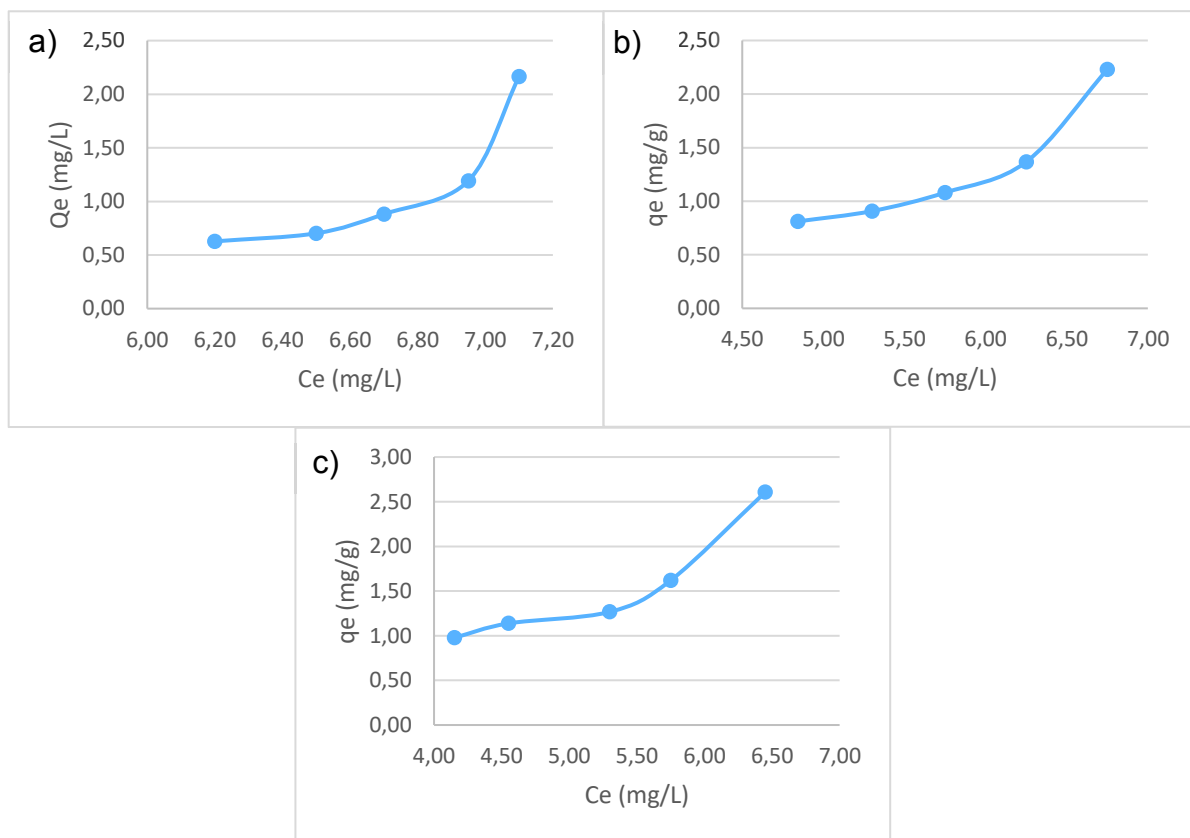
FIGURA 4.11. ISOTERMAS NO LINEALIZADAS PARA LA ADSORCIÓN DE F⁻ EN EL COTILEDÓN DE *Moringa oleifera*



a) Tamaño de partícula 0.71 mm, b) Tamaño de partícula 0.3 mm, c) Tamaño de partícula 0.212 mm.

ELABORACIÓN: López, 2018

FIGURA 4.12. ISOTERMAS NO LINEALIZADAS PARA LA ADSORCIÓN DE F⁻ EN LAS CÁSCARAS DE *Moringa oleifera*



a) Tamaño de partícula 0.71 mm, b) Tamaño de partícula 0.3 mm, c) Tamaño de partícula 0.212 mm.

ELABORACIÓN: López, 2018

Se puede observar en las Figuras 4.11 y 4.12, la isoterma de adsorción del flúor según las partes de la semilla de *Moringa oleifera*. Estas gráficas pueden ser identificadas como una isoterma del tipo H, de acuerdo a la clasificación de Giles. Este tipo de isoterma se considera como "High affinity" (alta afinidad) y representa adsorciones extremadamente fuertes en bandas de bajas concentraciones; lo que implica que la superficie del adsorbente tiene alta afinidad por el soluto (Sanchez et al., 2013).

En las Tablas 4.9 y 4.10, muestras los valores obtenidos del ajuste de los resultados en el proceso de adsorción a los modelos de Freundlich y Langmuir. A partir de los

datos obtenidos de las regresiones lineales aplicadas a la ecuación 2.2 y 2.5, se determinó el coeficiente de correlación para las distintas partes de la semilla.

Con respecto al modelo de Langmuir, las cáscaras de *Moringa oleifera* presentan un mejor ajuste de los resultados experimentales obtenidos. Por tanto, el proceso de adsorción se da por la saturación de una monocapa en la superficie del adsorbente. Este estudio se enmarca en los resultados de estudios anteriores al ajustarse el modelo de Langmuir cuando se utilizan las cáscaras de *Moringa oleifera* como bioadsorbentes para la remoción de metales pesados (García et al., 2012; Meneghel et al., 2013).

Por otra parte, el cotiledón se ajusta al modelo de Freundlich, formando una multicapa de fluoruros en la superficie del adsorbente, existiendo una interacción entre la superficie del adsorbente y los iones de flúor (Lagos, 2017). Estudios anteriores reportan el mismo comportamiento en la remoción de BTX (Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) y remoción de cadmio (Silva et al., 2011; Franco et al., 2013).

TABLA 4.6. PARÁMETROS DE ADSORCIÓN DE LANGMUIR PARA EL COTILEDÓN Y CÁSCARA DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera*.

| | Tamaño de partícula (mm) | R ² | Qmax | KL | RL |
|-----------|--------------------------------|----------------|------|------|------|
| Cotiledón | 0.71 | 0.86 | 0.43 | 0.11 | 0.55 |
| | 0.30 | 0.98 | 0.25 | 0.13 | 0.52 |
| | 0.21 | 0.97 | 0.45 | 0.11 | 0.56 |
| Cáscara | 0.71 | 0.93 | 0.14 | 0.13 | 0.52 |
| | 0.30 | 0.95 | 0.71 | 0.11 | 0.56 |
| | 0.21 | 0.93 | 1.65 | 0.09 | 0.63 |

ELABORACIÓN: López, 2018

TABLA 4.7 PARÁMETROS DEL MODELO DE FREUNDLICH PARA EL COTILEDÓN Y CÁSCARA DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera*

| | Tamaño de partícula (mm) | R ² | n | K _F |
|-----------|--------------------------------|----------------|------|-------------------------|
| Cotiledón | 0.71 | 0.91 | 0.29 | 1.90 x10 ⁻³ |
| | 0.30 | 0.99 | 0.17 | 1.98X10 ⁻⁵ |
| | 0.21 | 0.94 | 0.28 | 16.45 x10 ⁻⁴ |
| Cáscara | 0.71 | 0.84 | 0.12 | 1.05x10 ⁻⁵ |
| | 0.30 | 0.87 | 0.33 | 60.55 x10 ⁻⁴ |
| | 0.21 | 0.89 | 0.49 | 0.05 |

ELABORACIÓN: López, 2018

La constante de Langmuir (K_L) está relacionada con la energía de adsorción del sorbato sobre la superficie del adsorbente. En la Tabla 4.6 tanto como para el ensayo del cotiledón y cáscaras a un tamaño de 0.21 mm se obtuvo una constante de Langmuir (K_L) baja 0.11 y 0.09 respectivamente y una capacidad de adsorción (Q_{max}) de 0.45 y 1.65 mg/g respectivamente.

Como resultado, indica que se necesita una menor energía de adsorción para adsorber 0.45 mg o 1.65 mg de fluoruros por cada gramo de cotiledón o cáscara de *Moringa oleifera* respectivamente. La razón que ocurre este fenómeno, es debido a que aumenta el área específica por consiguiente se favorece el fenómeno de adsorción (Cucarella, 2007; García, 2010).

En cuanto al valor obtenido del parámetro de equilibrio de Langmuir (R_L), se encontró que para todos los ensayos tienen valores entre (0 <R_L <1) lo que indican una adsorción favorable (Queiroz, 2015)

En la Tabla 4.7 se puede observar como se obtiene un valor de K_f de 16.45×10^{-4} cuando el tamaño de partícula empleado en los ensayos para el cotiledón es de 0.30 mm, mientras que el K_F para la cáscara de *Moringa oleifera* es de 0.05 para el tamaño de adsorbente de 0.21 mm. Lo que indica que, para estos tamaños de partícula se tiene una mayor capacidad de adsorción del material (Haro, 2016).

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- La caracterización mediante SEM determinó que el cotiledón y las cáscaras de *Moringa oleifera* tienen una morfología porosa, mostrando espacios disponibles lo que permite inferir que, el adsorbente posee condiciones favorables para la adsorción de flúor en los intersticios.
- Los ensayos de caracterización por FTIR evidenciaron en el material, la presencia de grupos funcionales oxigenados como: carboxilos, hidroxilos y aminas, características de lignina y celulosa presentes en las cáscaras y de proteínas en el cotiledón de *Moringa oleifera*. Estos grupos funcionales oxigenados son los que interactuarán entre el flúor y la semilla.
- El cotiledón de *Moringa oleifera* presentó un punto de carga cero ligeramente ácido un, pH = 6.2, por el contrario, las cáscaras de *Moringa oleifera* dio un punto de carga cero casi neutro, pH = 7.2. Esto indica que a valores de pH superiores a estos se obtendrían una mayor eficiencia de remoción de fluoruros.
- Bajo una concentración inicial de 4 mg/L de KF, pH = 6, tamaño de partícula de 0.21 mm y dosis 5 mg/L de adsorbente, se logró una remoción del 76.62 % para el cotiledón y 80.00 % para las cáscaras de la semilla de *Moringa oleifera*.
- La cinética de adsorción muestra que mientras el tamaño de partícula sea más pequeño, más rápido se alcanza el estado estacionario, 40 minutos para el cotiledón y 60 minutos para las cáscaras con respecto a un tamaño de 0.21 mm de partícula

- La isoterma de adsorción a la que se ajusta el cotiledón de *Moringa oleifera* es el modelo de Freundlich, con un coeficiente de correlación de 0.91, 0.99 y 0.94 para un tamaño de 0.71 mm, 0.30 mm y 0.21 mm, respectivamente.
- La isoterma de Langmuir fue la que mejor se ajustó para la remoción de flúor con cáscara de *Moringa oleifera* obteniendo un coeficiente de correlación de 0.93, 0.95 y 0.93, para un tamaño de partícula de 0.71 mm, 0.30 mm y 0.21 mm respectivamente
- Debido a las eficiencias obtenidas en los ensayos batch, el cotiledón alcanzó una concentración final de flúor de 0.9 mg/L, mientras que la cáscara alcanzó una concentración final de 0.8 mg/L cumpliendo así con límites permisibles que debe cumplir el agua para consumo humano establecido en la norma INEN 1108:2014, concluyendo así que se puede considerar al material como una alternativa no convencional para el tratamiento de aguas de consumo humano

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda construir una curva para determinar el tiempo óptimo de secado de los adsorbentes (cáscara y cotiledón), con el fin de no alterar sus propiedades químicas que las componen y afecten a los ensayos de remoción de fluoruros.
- Con respecto a los ensayos de adsorción, se recomienda realizarlos con diferentes velocidades de agitación y tamaño de partícula para determinar las condiciones óptimas para la cáscara y cotiledón de la semilla de *Moringa oleifera*.

- Dado que a un menor tamaño de partícula aumenta el área superficial de adsorbente (cáscara y cotiledón), se recomienda utilizar tamaños menores a 0.21 mm para mejorar la eficiencia de remoción de fluoruros
- Debido a que las isotermas obtenidas en los ensayos no alcanzan un estado estacionario, en la que se obtiene una curva ascendente que tiende a un valor constante de saturación, podría ser mejorada si se incluyen dosis de adsorbentes inferiores a 1 g/L y superiores a 5 g/L
- Es recomendable ejecutar los experimentos de adsorción con agua subterránea real, para identificar la eficiencia de remoción y evaluar la implementación de filtros unifamiliares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, V., Borgues, S., Coelho, N. (2011) *Direct Zinc Determination in Brazilian Sugar Cane Spirit by Solid-Phase Extraccion Using Moringa Oleifera Husk in flow System with Detection by FAAS. International Journal of Analytical Chemistry, pp. 8.*
- Alvarado, M.A. (2014). *Inhibición del ion flúor en el agua potable de la comunidad Salasaca a través de la floculación (Tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, pp 72.*
- Amagloh, F. K., & Benang, A. (2009). *Effectiveness of Moringa oleifera seed as coagulant for water purification. African Journal of Agricultural Research, 4, pp. 119–123.*
- Andrade, C. (2015). *“Tratamiento de aguas contaminadas con crudo utilizando quitosano como adsorbente” (Tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, pp. 99.*
- Antov, M. G., Šciban, M. B., y Petrovic, N. J. (2010). *Proteins from common bean (Phaseolus vulgaris) seed as a natural coagulant. Bioresource Technology, pp. 2167–2172.*
- Arbito, J.A. (2015). *Caracterización del agua subterránea para uso en actividades productivas y humanas, en el cantón pasaje, 2014. (Tesis de pregrado). Universidad técnica de Machala, pp. 70.*
- Arguello, D.A. (2015). *Generalidades de la moringa (Moringa oleifera) y sus propiedades como alimento funcional (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Coahuila, México, pp.78.*

- Arroyo, D.A. (2016). *Nivel de flúor en agua de fuentes de abastecimiento y su relación con fluorosis en niños de 6 a 12 años de edad de la escuela Corazón de María perteneciente a la parroquia de Tumbaco (tesis de pregrado)*. Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, pp. 79.
- Asimbaya, C.G. (2016). *Obtención de materiales compuestos con propiedades magnéticas para la remoción de zinc a partir de residuos lignocelulósicos (Tesis de pregrado)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, pp. 58.
- Asociación para la Investigación y Desarrollo Integral (AIDER) , (2013). *Estudio de la composición química de la madera de diez especies maderables potenciales de bosques secundarios y primarios residuales*. Lima, Perú, pp.45.
- Asqui, R.P. (2018). *Estudio de dos sistemas de remoción de fluoruros para su aplicación en zonas andinas: alúmina activada y bentonita modificada (Tesis de pregrado)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, pp.116.
- Anandu, A., Kurian, D., Arshik, K., Meera, S. y Vinish, V. (2015). *Defluración of water using low-cost bio-adsorbents: A comparative study*. International Journal of Engineering Tchnology Science and Research, Kottayam, India, pp. 2394-3386.
- Ávila, R., Compeán, I., Silva, M.B. y Conzáles, J. (2012). *“Utilización de la espectroscopía RAMAN para caracterización de displasias provenientes del cuello uterino”*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, pp. 11.
- Bellino, N. (2012). *“ Aguas subterráneas conocimiento y explotación”*. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, pp. 227.

- Bhaumik, R. & Mondal N.K. (2015). Adsorption of fluoride from aqueous solution by a new low-cost adsorbent: thermally and chemically activated coconut fibre dust. Springer-Verlag, Berlin, Alemania, pp.16.*
- Bhaumik, R. & Mondal N.K. (2014). Optimizing adsorption of fluoride from water by modified banana peel dust using response surface modelling approach. Springer-Verlag, pp. 21.*
- Caldera, Y., Mendoza, I., Briceño, L., García, J., & Lorena, F. (2007). Eficiencia de las semillas de Moringa oleifera como coagulante alternativo en la potabilización del agua. Boletín del centro de investigaciones biológicas, Universidad de Zulia, pp. 244-254.*
- Campos J, Colina G, Fernández, N., Torres, G., Sulbará, B. y Ojeda, G.. (2003). Caracterización del agente coagulante activo de las semillas de Moringa oleifera mediante HPLC. Boletín del centro de investigaciones biológicas volumen 37., pp. 35-43.*
- Charco, D.Y. (2017). Fluorosis dental en estudiantes de 12 años: estudio comparativo entre la zona rural y urbana del cantón Riobamba provincia de Chimborazo (Tesis de Pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, pp. 117.*
- Chávez, M. & Domine, M. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, pp. 32.*
- Chiluiza, C.I., & Hernández, J.P. (2009). Elaboración de papel artesanal de caña de guadua (Guadua angustifolia K) (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, pp. 186.*

- CONAGUA (2011). *Agua en el Mundo*. Recuperado el 7 de agosto de 2017, de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/SINA/Capitulo_8.pdf
- Cortés, V. J. (Julio de 2015). *Propuesta de un sistema de biofiltración de cromo hexavalente en agua, utilizando olote de maiz (Tesis de Pregrado)*. Universidad Autónoma del Estado de México. México, pp. 112.
- Richardson, J., Harker, J. y Backhurst, J. (2002). *Coulson and Richardson's Chemical Engineering. Volumen 2. 5*, Ed. Woburn, Estados Unidos, Butterworth Heinemann.
- Cucarella, V. (2007). *Phosphorus recycling from wastewater to agriculture using reactive filter media*. KTH Architecture and the Built Environment, pp. 36.
- Deutsch, W.J. (1997). *Groundwater geochemistry: fundamentals and applications to contamination*. Ed. CRC Press, Boca Ratón, pp. 221.
- Dobaradaran, S., Kakkuee, M., Nabipour, I., Pazira, A., Zazauli, M.A., Keshtkan, M., Maryam, K. (2015). *Fluoride removal from Aqueous solutions using Moringa oleifera ash as an environmental friendly and cheap biosorbent*. *Fresenius Environmental Bulletin*, pp.1269-2174.
- Dos Santos, G.C., Da Silva G.F., Salcedo A.M. y Bergamasco R. (2012). *Fluoride Removal from Water Combined Moringa oleifera Ultrafiltración Process*. *Water Air Soil Pollut*, pp. 6083-6093.
- Escudero, E.I. (2016). *“Optimización de la planta de tratamiento de agua potable de la parroquia Totoras, cantón Ambato” (Tesis de grado)*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. pp.168.

- Food and Agricultural Organization (FAO), (2016). AQUASTAT. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html>*
- Feria, J., Bermudez, S. y Estrada, A. (2014). Eficiencia de la semilla Moringa oleifera como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú. Producción más Limpia, pp.9-22.*
- Folkard, G. & Sutherland, J. (1996). Moringa oleifera un árbol con enormes potencialidades. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). VOL 8, pp. 5.*
- Franco, M., Beltran, J. y Stipp, J.E. (2013). Use of Alginate-Moringa oleifera Beads on Cu (II) and Cd (II) Adsorption from Aquatic Systems. International Journal of Chemical Engineering and Applications. Vol 4, pp. 373-376.*
- García, B., Arnal, J., & Alandia, S. (2012). Estudio de la descontaminación de efluentes líquidos con elevada concentración de metales pesados mediante bioadsorbentes de Moringa oleifera. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Valencia : Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM) . pp.1098-1108.*
- García, B., Arnall, J., Piris, J., Lucas, B., & Sancho, M. (2014). Design of a continuous system of adsorption to remove heavy metals from water. Application to developing countries. 18th International Congress on Project Management and Engineering. Valencia, pp. 1787-1798.*
- García, E. (2010). Evaluación de la capacidad de retención de fósforo mediante procesos de adsorción empleando zeolita, y su aplicación en sistemas de humedales construidos para la depuración de aguas residuales urbanas (Tesis de pregrado). Universidad de Concepción, Concepción, Chile, pp.93.*

- Garritz, A. (2005). *Química general I. Universidad Nacional Autónoma de México.*
http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Capitulo16GarritzGasqueMartinez_27255.pdf
- Gómez, G. K. (2013). *Evaluación de rendimiento de extracción y caracterización fitoquímica de la fracción extraíble de semilla de moringa (Moringa oleifera Lam.), a nivel laboratorio. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, pp.180.*
- Haro, C.M. (2016). *Tratamiento de efluentes industriales de tenerías para la remoción de Cr(III). (Tesis de Pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, pp. 112.*
- Haro, B. M. (2015). *Estudio de prefactibilidad para la producción de harina de moringa como suplemento alimenticio del sector pecuario en la provincia de el oro (Tesis de Pregrado) Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador, pp. 38.*
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME), (2012). *La composición química de las aguas subterráneas naturales. Recuperado el 7 de agosto de 2017, de: http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1_1.pdf.*
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). (2013). *Censo de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales 2013.Ecuador en cifras. pp.34.*
- Junior, A. C. G., Meneghel, A. P., Rubio, F., Strey, L., Dragunski, D. C. et Coelho, G. F. (2013). *Applicability of Moringa oleifera Lam. pie as an adsorbent for removal of heavy metals from waters. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental, 17(1), pp.94–99.*

- Kumar, D.H., Sessaiah, K., Reddy, A.V., Madhava, M. et Wang, M.C. (2010). *Biosorption of Pb²⁺ from aqueous solutions by Moringa oleífera bark: Equilibrium and kinetic studies. Journal of Hazardous Materials, 174, pp.831-838.*
- Kumar, D.H., Ramana, D.K., Sessaiah, K. y Reddy, A.V. (2011). *Biosorption of Ni(II) from aqueous phase by Moringa oleifera bark, a low cost biosorbent. Desalination. pp.150-157.*
- Landa, S.E. (2016). *“Evaluación de la calidad físico químico y microbiológico de agua de consumo humano en la parroquia de Totoras, cantón Ambato, provincia de Tungurahua” (Tesis de Grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 85 pp.*
- Lara, J., Tejada, C., Villabona, A., Arrieta, A., Granados, C. (2016). *“Adsorption of lead and cadmium in continuous of fixed bed on cocoa waste”. Rev.ion, 29 (2), pp.113-124.*
- Losada, L.A., Sotto, M. A. y Artunduanga, O.F.. (2015). *Remoción de cromo hexavalente utilizando cáscaras de cáscaras de Moringa oleifera como bioadsorbente. NOVA grupo de Investigación, pp. 74-87.*
- Masquetti, V. (2012). *“Avaliação da desfluoretação de águas com coagulante de Moringa oleifera lam e do processo de separação por membranas” (Tesis de Posgrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, pp.135.*
- Masquetti, V., Bassetti, F y Bergamasco, R. (2013). *“Desfluoretação de águas subterrâneas a partir da coagulação/floculação com coagulante natural de semente de Moringa oleifera lam”. E-xacta, vol 6, pp.121-129..*

- Manciati, C. (2014). *“Etude de l’interaction surface –Souterrain du systeme aquifere Tumbaco – Cumbaya en Equateur, avec un approche hydrodynamique et geochemique”* (Tesis Doctoral). *Universite Montpellier 2, Montpellier, Francia*, pp. 285.
- Mandinic, Z., Curcic, M., Antonijevic, B., Carevic, M., Mandic, J., Djukic-Cosic, D., et al. (2010). *Fluoride in drinking water and dental fluorosis. The Science of the Total Environment*, 408, pp. 3507–3512.
- McCarty, P.L.; Sawyer, C.N. y Parkin, G.F. (2001). *Química para ingeniería ambiental*. 3, Ed. McGraw-Hill, Bogotá, pp. 713.
- Melo, V. G., & Turriago, R. F. (2012). *Evaluación de la eficiencia de la utilización de semillas de Moringa oleifera como una alternativa de biorremediación en la purificación de aguas superficiales del caño cola de pato ubicado en el sector rural del municipio de acacias. Universidad Nacional Abierta y a Distancia - Unad. Villavicencia, Colombia*, pp.82.
- Meneghel, A., Gonçalves, A., Strey, L., Rubio, F., & Daniel, S. (2013). *Biosorption and removal of chromium from water by using moringa seed cake (Moringa)*. *Quim. Nova*, pp.1104-1110.
- Molano, M. L. (2011). *Las semillas de Moringa oleifera Lam. Como alternativa de coagulante natural para purificación del agua (Tesis de Pregrado)*. *Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia*, pp. 43.
- Montaño, H.F (2014). *Producción de bioetanol a partir de material lignocelulósico de Moringa oleifera”* (Tesis de posgrado). *Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia*. pp.151.

- Moreno, M. A. (2013). *Estudio de diferentes bioadsorbentes como posibles retenedores de fosfatos en aguas (Tesis de pregrado)*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. pp. 98.
- Murrieta, R. M. (2014). *Determinación de la altura óptima de poda del cultivo de moringa (Moringa oleifera) con fines de producción en la zona de babahoyo (Tesis de Pregrado)*. Universidad Tecnica de Babahoyo, Babahoyo, Ecuador. pp.56.
- Nezamzadeh-Ejhieh, A., Kabiri-Samani, M. (2013). *Effective removal of Ni(II) from aqueous solutions by modification of nano particles of clinoptilolite with dimethylglyoxime*. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 260, pp. 339-349.
- Neeraj A., Vinay, K., Naseema K. y Masihur R. (2015). "Removal of fluoride from water by Moringa oleifera seed residue after oil extraction". *International Journal of Scientific y Engineering Research*. Vol 4, pp. 229-5518.
- Organización Mundial de la Salud (OMS), (2013). *Flúor en el agua de consumo*. Recuperado el 26 de Febrero de 2017. http://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=8193%3A2013-fluor-agua-consumo&catid=4716%3Ageneral&Itemid=39798&lang=es
- Orellana, M,F. (2016). *Diseño de sistema de tratamiento de agua potable para la comunidad de Bellavista cantón Colta (Tesis de Pregrado)*. Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Riobamba, Ecuador, pp.137.
- Ordoñez, A, E. (2014). *Bioadsorción de Pb y Cr mediante la utilización de cáscara de naranja (Citrus sinensis) molida (Tesis de Grado)*. Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador. pp.82.

- Ordoñez, J. (2011). "Aguas subterráneas- acuífero". *Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico, Lima, Perú.* pp.44.
- Parlikar, A., & Mokashi, S. (2013). *Defluoridation Of Water by Moringa oleifera- A Natural Adsorbent. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT), pp. 245-252.*
- Pollard, S. J., Thompson, F. E., & L., M. G. (1995). *Microporous carbons from Moringa oleifera husks for water purification in less developed countries. Pergamon, University of Edinburgh, pp.337-347.*
- Proaño, C. y Gastón, N. (2009). *El agua subterránea como fuente de abastecimiento para varios usos. Obtenido de : <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/6372>.*
- Queiroz, F. (2015). *Remocao de diclofenaco do meio aquoso utilizando sementes de Moringa oleifera (Tesis de posgrado). Universidade Federal de Uberlandia, Uberlândia, Brasil, pp. 104.*
- Ramos, A.E. (2016). "Evaluación microbiológica y fisico-química de la calidad del agua para consumo humano de la junta administradora de agua potable Galten – Guilbut ubicada en el cantón Chambo" (Tesis de Pregrado). *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. pp.113.*
- Reck, I.M., Manesco, R., Bergamasco, R., Fernandes y M., Marqueototti, A. (2018). *Removal of tartrazine from aqueous solutions using adsorbents based on activated carbon and Moringa oleifera seeds. Journal of Cleaner Production. pp. 85-97.*

- Ríos, P.E. (2014). " *Cinética de bioadsorción de arsénico utilizando cáscara de banano maduro en polvo*" (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica De Machala, El Oro, Ecuador. pp.107.
- Rodríguez, M., Flores, S., & Rangel, M. (2015). *Un estudio de la remoción de manganeso (II) a partir de sistemas acuosos usando cápsulas de Moringa oleifera como bioadsorbente*. Revista CENIC Ciencias Biológicas, pp.424-433.
- Rojo, F. (2013). *Tablas de espectroscopía Infrarroja*. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 25 abril del 2018 de: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/TablasIR_24985.pdf
- Rubio, A.M. (2015). *Estudio para la reducción de boro y fosfatos en aguas subterráneas*. (Tesis de Pregrado). Universidad Central del Ecuador. 120pp
- Sanchez, K., Colina, G., Prier, M., Días, A., Carrasquero, S., 2013. *Adsorption capacity of actived carbon on total chromium from tannery waste*. Revista Técnica Universidad de Zulia, vol 36, pp. 45-52.
- Silva, I.L., Antoniosi, N.R., Ribeiro, M.I, Carvalho, B.C. y Nívia, M.C. (2011). *Removal of BTEX from aqueous solution using Moringa oleifera seed cake*. Environmental Technology, pp. 1-7.
- Subha, E., S.Sasikala, & G.Muthuraman. (2015). *Removal of Phosphate from wastewater using natural adsorbents*. International Journal of ChemTech Research, pp. 3095-3099.
- Tejada, C., Villabona, A. & Garcés, L. (2014). *Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico*. Tecnológicas. Vol 18, pp. 109-123.

- Tenelema, D. (2017). Evaluación físico, químico y microbiológico del agua de la junta de agua potable de la parroquia San Miguelito, cantón Pillaro, provincia de Tungurahua (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Riobamba, Ecuador, pp. 151.*
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2012). "Efecto y espectroscopía RAMAN". Recuperado de: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/exposicion_raman_5044.pdf*
- UNESCO. (2012). Los recursos de agua subterránea del mundo están sufriendo los efectos de una gobernanza insuficiente. Recuperado de http://www.unesco.org/new/es/media-services/single-view/news/los_recursos_de_agua_subterranea_del_mundo_estan_sufriendo/*
- Vera, V. & Morocho, D. (2015). Evaluación de adsorción de plomo y mercurio en carbón activado proveniente de la cascarilla de arroz (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador. pp. 53.*
- Vega, E.A. (2017). Estudio de la aplicación de la cáscara de huevo en la remoción de fluoruros en aguas claras (Tesis de Pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. pp. 86.*
- Villareal, A., & Ortega, K. (2014). Review of characteristics and uses of the plant *Moringa oleifera*. Investigación y desarrollo Universidad de Cartagena, pp.309-329.*
- Vivek, C.M. y Karthikeyan, J. (2011). Removal of fluoride from water using low-cost materials. International Water Technology Journal, pp.1-12.*

- Winward, G.P., Avery, L.M., Frazer, R.W., Pidou, M., Jefferey, P., Stephenson, T. y Bruce, J. *A Study of the microbial quality of grey water and an evaluation of treatment technologies for reuse. Ecological Engineering. pp.187-197.*
- Yean, S., Cong, L., Yavuz, C.T., Mayo, J.T., Yu, W.W., Kan, A.T. y Tomson, M.B. (2005). *Effect of magnetite particles size on adsorption and desorption of arsenite and arsenate". Journal of Materials Research, 20(12), pp.3255-3264.*
- Yubaille, D. (2017). *"Evaluación de la calidad física, química, microbiológica y resistencia bacteriana del agua de consumo humano de la parroquia Punín cantón Riobamba, provincia de Chimborazo."* (Tesis de Pregrado). *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, pp.115.*

ANEXOS

ANEXO N° 1
DATOS EXPERIMENTALES DE LA LIGNINA, HOLOCELULOSA Y
CELULOSA

a) Datos experimentales de la lignina

| | Masa inicial (g) | Masa del crisol (g) | Masa final |
|--------------------|------------------|---------------------|------------|
| Primera repetición | 1.0750 | 28.5727 | 28.8059 |
| Segunda repetición | 1.0152 | 29.0901 | 29.3101 |
| Tercera repetición | 1.0327 | 40.6146 | 40.8407 |

b) Datos experimentales de la materia orgánica de lignina

| Masa inicial (g) | Masa del crisol (g) | Masa final |
|------------------|---------------------|------------|
| 0.4121 | 28.0266 | 28.04121 |

c) Datos experimentales de la holocelulosa

| Masa inicial (g) | Masa del crisol (g) | Masa final |
|------------------|---------------------|------------|
| 2.0297 | 41.5505 | 43.0541 |
| 2.0256 | 31.631 | 33.1387 |

d) Datos experimentales para el cálculo de materia orgánica de holocelulosa

| Masa inicial (g) | Masa del crisol (g) | Masa final |
|------------------|---------------------|------------|
| 0.6293 | 41.5505 | 41.6412 |

e) Datos experimentales de la celulosa

| | Masa inicial (g) | Masa del crisol (g) | Masa final |
|--------------------|------------------|---------------------|------------|
| Primera repetición | 31.4922 | 32.1407 | 0.6485 |
| Segunda repetición | 26.3783 | 27.0702 | 0.6919 |

f) Datos experimentales de la materia orgánica de celulosa

| Masa inicial (g) | Masa del crisol (g) | Masa final |
|------------------|---------------------|------------|
| 0.6485 | 37.8436 | 38.0289 |

FIGURA AI.1 REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL ENSAYO DE TERMINACIÓN DE LIGNINA



ELABORACIÓN: López, 2018

**FIGURA A1.2 REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL ENSAYO DE TERMINACIÓN
DE CELULOSA**



ELABORACIÓN: López, 2018

ANEXO N° 2
DATOS EXPERIMENTALES DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN
PARA EL COTILEDÓN

a) Condiciones iniciales

| | |
|--------------------------------|---------|
| Concentración inicial de Flúor | 9 mg/L |
| Tamaño de partícula | 0.71 mm |
| Volumen por jarra | 0.6 L |
| Revoluciones | 100 rpm |

b) Datos experimentales

| Cantidad de adsorbente (g) | Primera repetición | | | | | Segunda repetición | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.610 | 1.247 | 1.908 | 2.429 | 3.008 | 0.610 | 1.237 | 1.809 | 2.412 | 3.065 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | Concentración (mg/L) | | | | |
| 0 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 8.7 | 8.7 | 8.7 | 8.7 | 8.7 |
| 20 | 9.1 | 8.3 | 8 | 9.1 | 9.2 | 7.8 | 8.3 | 8.1 | 7.1 | 7.5 |
| 40 | 8.4 | 7.2 | 7.4 | 8 | 8.7 | 7.1 | 6.8 | 7.7 | 6.5 | 6.6 |
| 60 | 8.2 | 6.7 | 6.5 | 7.5 | 6 | 6.7 | 6.7 | 6.2 | 5.8 | 6.2 |
| 80 | 8 | 6.6 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.7 | 6.1 | 5.8 | 5.5 | 5.2 |
| 100 | 8 | 6.6 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.7 | 6.1 | 5.8 | 5.5 | 5.2 |
| 120 | 8 | 6.6 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.7 | 6.1 | 5.8 | 5.5 | 5.2 |

| Cantidad de adsorbente (g) | Promedio | | | | | Desviación estándar | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.610 | 1.242 | 1.858 | 2.421 | 3.037 | 0.610 | 1.242 | 1.858 | 2.421 | 3.037 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | | | | | |
| 0 | 9.1 | 9.1 | 9.1 | 9.10 | 9.1 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| 20 | 8.45 | 8.3 | 8.05 | 8.1 | 8.35 | 0.92 | 0.00 | 0.04 | 0.7 | 1.20 |
| 40 | 7.75 | 7 | 7.55 | 7.3 | 7.65 | 0.92 | 0.14 | 0.11 | 0.5 | 1.48 |
| 60 | 7.45 | 6.7 | 6.35 | 6.7 | 6.1 | 1.06 | 0.00 | 0.11 | 0.6 | 0.14 |
| 80 | 7.35 | 6.35 | 6 | 5.9 | 5.65 | 0.92 | 0.18 | 0.14 | 0.2 | 0.64 |
| 100 | 7.35 | 6.35 | 6 | 5.9 | 5.65 | 0.92 | 0.18 | 0.14 | 0.2 | 0.64 |
| 120 | 7.35 | 6.35 | 6 | 5.9 | 5.65 | 0.92 | 0.18 | 0.14 | 0.2 | 0.64 |

c) Condiciones iniciales

| | |
|--------------------------------|---------|
| Concentración inicial de Flúor | 4 mg/L |
| Tamaño de partícula | 0.71 mm |
| Volumen por jarra | 0.6 L |
| Revoluciones | 100 rpm |

d) Datos experimentales

| Cantidad de adsorbente (g) | Primera repetición | | | | | Segunda repetición | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.612 | 1.241 | 1.814 | 2.459 | 3.568 | 0.610 | 1.248 | 1.835 | 2.394 | 3.017 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | Concentración (mg/L) | | | | |
| 0 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.20 | 4.20 | 4.20 | 4.20 | 4.20 |
| 20 | 3.80 | 3.70 | 3.90 | 4.10 | 3.90 | 3.90 | 3.70 | 3.50 | 3.50 | 3.10 |
| 40 | 3.60 | 3.70 | 3.70 | 3.60 | 3.10 | 3.50 | 3.30 | 2.90 | 3.30 | 2.60 |
| 60 | 3.40 | 3.40 | 3.50 | 2.80 | 2.60 | 3.50 | 2.80 | 2.60 | 2.80 | 2.20 |
| 80 | 3.40 | 2.80 | 2.50 | 2.30 | 2.00 | 3.20 | 2.60 | 2.50 | 2.20 | 1.80 |
| 100 | 3.40 | 2.80 | 2.50 | 2.30 | 2.00 | 3.20 | 2.60 | 2.50 | 2.20 | 1.80 |
| 120 | 3.40 | 2.80 | 2.50 | 2.30 | 2.00 | 3.20 | 2.60 | 2.50 | 2.20 | 1.80 |

| Cantidad de adsorbente (g) | Promedio | | | | | Desviación estándar | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.611 | 1.244 | 1.824 | 2.426 | 3.293 | 0.611 | 1.244 | 1.824 | 2.426 | 3.293 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | | | | | |
| 0 | 4.10 | 4.10 | 4.10 | 4.10 | 4.10 | 0.141 | 0.071 | 0.071 | 0.071 | 0.141 |
| 20 | 3.85 | 3.70 | 3.70 | 3.80 | 3.50 | 0.071 | 0.000 | 0.141 | 0.212 | 0.566 |
| 40 | 3.55 | 3.50 | 3.30 | 3.45 | 2.85 | 0.071 | 0.141 | 0.283 | 0.106 | 0.354 |
| 60 | 3.45 | 3.10 | 3.05 | 2.80 | 2.40 | 0.071 | 0.212 | 0.318 | 0.000 | 0.283 |
| 80 | 3.30 | 2.70 | 2.50 | 2.25 | 1.90 | 0.141 | 0.071 | 0.000 | 0.035 | 0.141 |
| 100 | 3.30 | 2.70 | 2.50 | 2.25 | 1.90 | 0.141 | 0.071 | 0.000 | 0.035 | 0.141 |
| 120 | 3.30 | 2.70 | 2.50 | 2.25 | 1.90 | 0.141 | 0.071 | 0.000 | 0.035 | 0.141 |

e) Condiciones iniciales

| | |
|--------------------------------|---------|
| Concentración inicial de Flúor | 9 mg/L |
| Tamaño de partícula | 0.3 mm |
| Volumen por jarra | 0.6 L |
| Revoluciones | 100 rpm |

f) Datos experimentales

| Cantidad de adsorbente (g) | Primera repetición | | | | | Segunda repetición | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.604 | 1.208 | 1.808 | 2.498 | 2.990 | 0.604 | 1.207 | 1.821 | 2.437 | 3.006 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | Concentración (mg/L) | | | | |
| 0 | 9.6 | 9.6 | 9.6 | 9.6 | 9.6 | 9.2 | 9.2 | 9.2 | 9.2 | 9.2 |
| 20 | 8.3 | 9.4 | 8.4 | 8.9 | 9.1 | 7.8 | 7.8 | 8.1 | 8.2 | 7.9 |
| 40 | 7.9 | 8.8 | 8.3 | 8.5 | 8.3 | 7.5 | 7.2 | 7.9 | 7.5 | 7.2 |
| 60 | 7.5 | 7.3 | 7.2 | 6.8 | 6.5 | 7.2 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.2 |
| 80 | 7.1 | 6.7 | 6.3 | 6.1 | 5.9 | 7.1 | 6.4 | 6.2 | 6 | 5.7 |
| 100 | 7.1 | 6.7 | 6.3 | 6.1 | 5.9 | 7.1 | 6.4 | 6.2 | 6 | 5.7 |
| 120 | 7.1 | 6.7 | 6.3 | 6.1 | 5.9 | 7.1 | 6.4 | 6.2 | 6 | 5.7 |

| Cantidad de adsorbente (g) | Promedio | | | | | Desviación estándar | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.604 | 1.207 | 1.814 | 2.467 | 2.998 | 0.604 | 1.207 | 1.814 | 2.467 | 2.998 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | | | | | |
| 0 | 9.4 | 9.4 | 9.4 | 9.40 | 9.4 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 |
| 20 | 8.1 | 8.6 | 8.25 | 8.6 | 8.5 | 0.35 | 0.57 | 0.11 | 0.2 | 0.85 |
| 40 | 7.7 | 8 | 8.1 | 8.0 | 7.75 | 0.28 | 0.57 | 0.14 | 0.4 | 0.78 |
| 60 | 7.35 | 6.9 | 6.85 | 6.6 | 6.35 | 0.21 | 0.28 | 0.25 | 0.1 | 0.21 |
| 80 | 7.1 | 6.55 | 6.25 | 6.1 | 5.8 | 0.00 | 0.11 | 0.04 | 0.0 | 0.14 |
| 100 | 7.1 | 6.55 | 6.25 | 6.1 | 5.8 | 0.00 | 0.11 | 0.04 | 0.0 | 0.14 |
| 120 | 7.1 | 6.55 | 6.25 | 6.1 | 5.8 | 0.00 | 0.11 | 0.04 | 0.0 | 0.14 |

g) Condiciones iniciales

| | |
|--------------------------------|---------|
| Concentración inicial de Flúor | 4 mg/L |
| Tamaño de partícula | 0.3 mm |
| Volumen por jarra | 0.6 L |
| Revoluciones | 100 rpm |

h) Datos experimentales

| Cantidad de adsorbente (g) | Primera repetición | | | | | Segunda repetición | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.602 | 1.202 | 1.818 | 2.432 | 3.018 | 0.601 | 1.209 | 1.811 | 2.408 | 3.041 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | Concentración (mg/L) | | | | |
| 0 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 |
| 20 | 4.1 | 4.1 | 3.8 | 3.5 | 2.5 | 3.8 | 3.7 | 3.2 | 4.1 | 4.5 |
| 40 | 3.8 | 3.6 | 3.2 | 2.8 | 2.3 | 3.1 | 3.1 | 2.9 | 2.2 | 2.2 |
| 60 | 3.2 | 3.1 | 2.7 | 1.9 | 1.7 | 2.9 | 2.7 | 2.2 | 1.9 | 1.8 |
| 80 | 3.1 | 2.5 | 2.4 | 1.7 | 1.5 | 2.8 | 2.3 | 1.9 | 1.8 | 1.5 |
| 100 | 3.1 | 2.5 | 2.4 | 1.7 | 1.5 | 2.8 | 2.3 | 1.9 | 1.8 | 1.5 |

| Cantidad de adsorbente (g) | Promedio | | | | | Desviación estándar | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.602 | 1.205 | 1.814 | 2.420 | 3.030 | 0.602 | 1.205 | 1.814 | 2.420 | 3.030 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | | | | | |
| 0 | 4 | 4 | 4 | 4.00 | 4 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 |
| 20 | 3.95 | 3.9 | 3.5 | 3.8 | 3.5 | 0.21 | 0.14 | 0.21 | 0.2 | 1.41 |
| 40 | 3.45 | 3.35 | 3.05 | 2.5 | 2.25 | 0.49 | 0.18 | 0.11 | 0.2 | 0.07 |
| 60 | 3.05 | 2.9 | 2.45 | 1.9 | 1.75 | 0.21 | 0.14 | 0.18 | 0.0 | 0.07 |
| 80 | 2.95 | 2.4 | 2.15 | 1.8 | 1.5 | 0.21 | 0.07 | 0.18 | 0.0 | 0.00 |
| 100 | 2.95 | 2.4 | 2.15 | 1.8 | 1.5 | 0.21 | 0.07 | 0.18 | 0.0 | 0.00 |

i) Condiciones iniciales

| | |
|--------------------------------|----------|
| Concentración inicial de Flúor | 9 mg/L |
| Tamaño de partícula | 0.212 mm |
| Volumen por jarra | 0.6 L |
| Revoluciones | 100 rpm |

j) Datos experimentales

| Cantidad de adsorbente (g) | Primera repetición | | | | | Segunda repetición | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.596 | 1.235 | 1.801 | 2.408 | 3.001 | 0.602 | 1.201 | 1.810 | 2.409 | 3.001 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | Concentración (mg/L) | | | | |
| 0 | 8.9 | 8.9 | 8.9 | 8.9 | 8.9 | 9.2 | 9.2 | 9.2 | 9.2 | 9.2 |
| 10 | 8.1 | 8.5 | 7.8 | 7.2 | 7.0 | 8.8 | 8.8 | 8.7 | 8.5 | 8.28 |
| 20 | 7.8 | 7.5 | 7.9 | 6.7 | 6.7 | 8.5 | 8.3 | 7.5 | 7.36 | 7.36 |
| 30 | 7.4 | 7.1 | 6.7 | 6.3 | 6.0 | 7.5 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 6.9 |
| 40 | 7.1 | 6.6 | 6.1 | 5.6 | 5.5 | 7.3 | 6.7 | 6.4 | 5.9 | 5.6 |
| 50 | 7.1 | 6.6 | 6.1 | 5.6 | 5.5 | 7.3 | 6.7 | 6.4 | 5.9 | 5.6 |
| 60 | 7.1 | 6.6 | 6.1 | 5.6 | 5.5 | 7.3 | 6.7 | 6.4 | 5.9 | 5.6 |

| Cantidad de adsorbente (g) | Promedio | | | | | Desviación estándar | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.599 | 1.218 | 1.807 | 2.409 | 3.001 | 0.599 | 1.218 | 1.807 | 2.409 | 3.001 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | Concentración (mg/L) | | | | |
| 0 | 9.05 | 9.05 | 9.05 | 9.05 | 9.05 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |
| 10 | 8.45 | 8.65 | 8.25 | 7.9 | 7.653 | 0.49 | 0.11 | 0.32 | 0.5 | 0.89 |
| 20 | 7.65 | 7.9 | 7.7 | 7.0 | 7.053 | 0.21 | 0.28 | 0.14 | 0.3 | 0.43 |
| 30 | 7.3 | 7.15 | 6.95 | 6.7 | 6.448 | 0.14 | 0.04 | 0.18 | 0.3 | 0.64 |
| 40 | 7.2 | 6.65 | 6.25 | 5.8 | 5.564 | 0.14 | 0.04 | 0.11 | 0.1 | 0.05 |
| 50 | 7.2 | 6.65 | 6.25 | 5.8 | 5.564 | 0.14 | 0.04 | 0.11 | 0.1 | 0.05 |
| 60 | 7.2 | 6.65 | 6.25 | 5.8 | 5.564 | 0.14 | 0.04 | 0.11 | 0.1 | 0.05 |

k) Condiciones iniciales

| | |
|--------------------------------|----------|
| Concentración inicial de Flúor | 4 mg/L |
| Tamaño de partícula | 0.212 mm |
| Volumen por jarra | 0.6 L |
| Revoluciones | 100 rpm |

l) Datos experimentales

| Cantidad de adsorbente (g) | Primera repetición | | | | | Segunda repetición | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.615 | 2.065 | 1.806 | 2.405 | 3.068 | 0.598 | 1.213 | 1.811 | 2.401 | 2.980 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | Concentración (mg/L) | | | | |
| 0 | 4.2 | 4.2 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 4 | 4 | 3.8 | 3.8 | 3.8 |
| 10 | 3 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.5 | 3.2 | 2.9 | 2.7 | 2.4 | 2.2 |
| 20 | 2.6 | 2.7 | 2.3 | 2 | 2.2 | 2.4 | 2.5 | 2.2 | 2.1 | 2.1 |
| 30 | 2.2 | 2.5 | 2.1 | 1.5 | 1.7 | 2 | 2.2 | 1.7 | 1.6 | 1.5 |
| 40 | 2.1 | 1.5 | 1.3 | 1.1 | 0.9 | 1.9 | 1.5 | 1.2 | 1.1 | 0.9 |
| 50 | 2.1 | 1.5 | 1.3 | 1.1 | 0.9 | 1.9 | 1.5 | 1.2 | 1.1 | 0.9 |
| 60 | 2.1 | 1.5 | 1.3 | 1.1 | 0.9 | 1.9 | 1.5 | 1.2 | 1.1 | 0.9 |

| Cantidad de adsorbente (g) | Promedio | | | | | Desviación estándar | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.607 | 1.639 | 1.808 | 2.403 | 3.024 | 0.607 | 1.639 | 1.808 | 2.403 | 3.024 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | | | | | |
| 0 | 4.1 | 4.1 | 3.85 | 3.85 | 3.85 | 0.14 | 0.07 | 0.04 | 0.04 | 0.07 |
| 10 | 3.1 | 3 | 2.95 | 2.9 | 2.85 | 0.14 | 0.07 | 0.18 | 0.3 | 0.92 |
| 20 | 2.5 | 2.6 | 2.25 | 2.1 | 2.15 | 0.14 | 0.07 | 0.04 | 0.0 | 0.07 |
| 30 | 2.1 | 2.35 | 1.9 | 1.6 | 1.6 | 0.14 | 0.11 | 0.14 | 0.0 | 0.14 |
| 40 | 2 | 1.5 | 1.25 | 1.1 | 0.9 | 0.14 | 0.00 | 0.04 | 0.0 | 0.00 |
| 50 | 2 | 1.5 | 1.25 | 1.1 | 0.9 | 0.14 | 0.00 | 0.04 | 0.0 | 0.00 |
| 60 | 2 | 1.5 | 1.25 | 1.1 | 0.9 | 0.14 | 0.00 | 0.04 | 0.0 | 0.00 |

m) Condiciones finales

| Tamaño de partícula | Masa de adsorbente | Turbiedad |
|---------------------|--------------------|-----------|
| 0.71mm | 5 g/L | 2.66 NTU |
| 0.3 mm | 5 g/L | 3 NTU |
| 0.212 mm | 5 g/L | 3.48 NTU |

ANEXO N° 3
DATOS EXPERIMENTALES DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN
PARA LAS CÁSCARAS

a) Condiciones iniciales

| | |
|--------------------------------|---------|
| Concentración inicial de Flúor | 9 mg/L |
| Tamaño de partícula | 0.71 mm |
| Volumen por jarra | 0.6 L |
| Revoluciones | 100 rpm |

b) Datos experimentales

| Cantidad de adsorbente (g) | Primera repetición | | | | | Segunda repetición | | | | |
|----------------------------|----------------------|-----|------|------|-------|----------------------|------|------|------|------|
| | 0.6455 | 1.2 | 1.8 | 2.45 | 3.011 | 0.6008 | 1.21 | 1.81 | 2.41 | 3.01 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | Concentración (mg/L) | | | | |
| 0 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.2 | 9.2 | 9.2 | 9.2 | 9.2 |
| 20 | 9.2 | 8.6 | 8.74 | 8.5 | 8.645 | 9.108 | 8.3 | 8.5 | 7.7 | 7.5 |
| 40 | 8.7 | 7.8 | 8.27 | 7.8 | 7.695 | 8.4 | 7.8 | 8.2 | 7.2 | 7.3 |
| 60 | 7.9 | 7.2 | 7.79 | 7.2 | 6.745 | 8.2 | 7.5 | 7.2 | 6.5 | 6.7 |
| 80 | 7.8 | 7.1 | 7.6 | 6.8 | 6.5 | 7.8 | 7.2 | 6.9 | 6.6 | 6.4 |
| 100 | 7.1 | 7 | 6.7 | 6.6 | 6.2 | 7.1 | 6.9 | 6.7 | 6.4 | 6.2 |
| 120 | 7.1 | 7 | 6.7 | 6.6 | 6.2 | 7.1 | 6.9 | 6.7 | 6.4 | 6.2 |
| 140 | 7.1 | 7 | 6.7 | 6.6 | 6.2 | 7.1 | 6.9 | 6.7 | 6.4 | 6.2 |

| Cantidad de adsorbente (g) | Promedio | | | | | Desviación estándar | | | | |
|----------------------------|----------------------|------|------|------|------|---------------------|------|------|------|------|
| | 0.62 | 1.21 | 1.8 | 2.43 | 3.01 | 0.62 | 1.21 | 1.8 | 2.43 | 3.01 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | | | | | |
| 0 | 9.35 | 9.35 | 9.35 | 9.35 | 9.35 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |
| 20 | 9.15 | 8.45 | 8.62 | 8.1 | 8.07 | 0.07 | 0.11 | 0.08 | 0.3 | 0.81 |
| 40 | 8.55 | 7.8 | 8.23 | 7.5 | 7.5 | 0.21 | 0.00 | 0.02 | 0.2 | 0.28 |
| 60 | 8.05 | 7.35 | 7.5 | 6.9 | 6.72 | 0.21 | 0.11 | 0.21 | 0.2 | 0.03 |
| 80 | 7.8 | 7.15 | 7.25 | 6.7 | 6.45 | 0.00 | 0.04 | 0.25 | 0.1 | 0.07 |
| 100 | 7.1 | 6.95 | 6.7 | 6.5 | 6.2 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.1 | 0.00 |
| 120 | 7.1 | 6.95 | 6.7 | 6.5 | 6.2 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.1 | 0.00 |
| 140 | 7.1 | 6.95 | 6.7 | 6.5 | 6.2 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.1 | 0.00 |

c) Condiciones iniciales

| | |
|--------------------------------|---------|
| Concentración inicial de Flúor | 4 mg/L |
| Tamaño de partícula | 0.71 mm |
| Volumen por jarra | 0.6 L |
| Revoluciones | 100 rpm |

d) Datos experimentales

| Cantidad de adsorbente (g) | Primera repetición | | | | | Segunda repetición | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.598 | 1.206 | 1.801 | 2.410 | 3.019 | 0.612 | 1.208 | 1.811 | 2.401 | 3.016 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | Concentración (mg/L) | | | | |
| 0 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 20 | 3.8 | 3.7 | 3.2 | 3.1 | 3.4 | 4.1 | 4.4 | 4.1 | 4.1 | 4 |
| 40 | 3 | 3.4 | 2.5 | 2.8 | 3.3 | 4.1 | 3.6 | 3.8 | 3.7 | 3.8 |
| 60 | 3.1 | 2.6 | 2.4 | 2.6 | 3 | 3.9 | 3.4 | 3.2 | 3.4 | 3.6 |
| 80 | 2.7 | 2.4 | 2.2 | 2.4 | 2.3 | 3.3 | 2.9 | 2.6 | 2.2 | 2.2 |
| 100 | 2.7 | 2.4 | 2.3 | 2.2 | 2.1 | 3.1 | 2.8 | 2.6 | 2.4 | 2.2 |
| 120 | 2.7 | 2.4 | 2.3 | 2.2 | 2.1 | 3.1 | 2.8 | 2.6 | 2.4 | 2.2 |

| Cantidad de adsorbente (g) | Promedio | | | | | Desviación estándar | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.605 | 1.208 | 1.806 | 2.406 | 3.017 | 0.605 | 1.208 | 1.806 | 2.406 | 3.017 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | | | | | |
| 0 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.50 | 4.5 | 0.71 | 0.71 | 0.71 | 0.71 | 0.71 |
| 20 | 3.95 | 4.05 | 3.65 | 3.6 | 3.7 | 0.21 | 0.25 | 0.32 | 0.4 | 0.42 |
| 40 | 3.55 | 3.5 | 3.15 | 3.3 | 3.3 | 0.78 | 0.07 | 0.46 | 0.3 | 0.35 |
| 60 | 3.5 | 3 | 2.8 | 3.0 | 2.8 | 0.57 | 0.28 | 0.28 | 0.3 | 0.42 |
| 80 | 3 | 2.65 | 2.4 | 2.3 | 2.25 | 0.42 | 0.18 | 0.14 | 0.1 | 0.07 |
| 100 | 2.9 | 2.6 | 2.45 | 2.3 | 2.15 | 0.28 | 0.14 | 0.11 | 0.1 | 0.07 |
| 120 | 2.9 | 2.6 | 2.45 | 2.3 | 2.15 | 0.28 | 0.14 | 0.11 | 0.1 | 0.07 |

e) Condiciones iniciales

| | |
|--------------------------------|---------|
| Concentración inicial de Flúor | 9 mg/L |
| Tamaño de partícula | 0.3 mm |
| Volumen por jarra | 0.6 L |
| Revoluciones | 100 rpm |

f) Datos experimentales

| Cantidad de adsorbente (g) | Primera repetición | | | | | Segunda repetición | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.611 | 1.209 | 1.806 | 2.410 | 3.093 | 0.600 | 1.206 | 1.804 | 2.480 | 3.058 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | Concentración (mg/L) | | | | |
| 0 | 9.2 | 9.2 | 9.2 | 9.2 | 9.2 | 8.6 | 8.6 | 8.6 | 8.6 | 8.6 |
| 20 | 8.1 | 7.9 | 7.7 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 7.7 | 7.4 | 6.68 | 6.59 |
| 40 | 7.7 | 7.4 | 7.1 | 6.5 | 6.6 | 7.5 | 7.5 | 7.3 | 6.13 | 6.31 |
| 60 | 7.7 | 6.3 | 6.9 | 6.1 | 5.8 | 7.2 | 6.9 | 6.8 | 5.67 | 5.1 |
| 80 | 6.8 | 6.3 | 5.8 | 5.5 | 5.2 | 6.5 | 6.2 | 5.7 | 5.1 | 4.48 |
| 100 | 6.8 | 6.3 | 5.8 | 5.5 | 5.2 | 6.5 | 6.2 | 5.7 | 5.1 | 4.48 |
| 120 | 6.8 | 6.3 | 5.8 | 5.5 | 5.2 | 6.5 | 6.2 | 5.7 | 5.1 | 4.48 |

| Cantidad de adsorbente (g) | Promedio | | | | | Desviación estándar | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.606 | 1.207 | 1.805 | 2.445 | 3.076 | 0.606 | 1.207 | 1.805 | 2.445 | 3.076 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | | | | | |
| 0 | 8.9 | 8.9 | 8.9 | 8.9 | 8.9 | 0.42 | 0.42 | 0.42 | 0.42 | 0.42 |
| 20 | 8 | 7.8 | 7.55 | 7.2 | 7.19 | 0.14 | 0.14 | 0.21 | 0.72 | 0.86 |
| 40 | 7.6 | 7.45 | 7.2 | 6.3 | 6.46 | 0.14 | 0.07 | 0.14 | 0.26 | 0.20 |
| 60 | 7.5 | 6.6 | 6.85 | 5.9 | 5.42 | 0.28 | 0.42 | 0.07 | 0.30 | 0.54 |
| 80 | 6.65 | 6.25 | 5.75 | 5.3 | 4.84 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.28 | 0.51 |
| 100 | 6.65 | 6.25 | 5.75 | 5.3 | 4.84 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.28 | 0.51 |
| 120 | 6.65 | 6.25 | 5.75 | 5.3 | 4.84 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.28 | 0.51 |

g) Condiciones iniciales

| | |
|--------------------------------|--------|
| Concentración inicial de Flúor | 4 mg/L |
| Tamaño de partícula | 0.3 mm |
| Volumen por jarra | 0.6 L |
| Revoluciones | 100 m |

h) Datos experimentales

| Cantidad de adsorbente (g) | Primera repetición | | | | | Segunda repetición | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.610 | 1.247 | 1.908 | 2.589 | 3.008 | 0.610 | 1.237 | 1.809 | 2.484 | 3.065 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | Concentración (mg/L) | | | | |
| 0 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 |
| 20 | 3.6 | 3.2 | 3.2 | 3.3 | 2.9 | 3.4 | 3.4 | 3.4 | 2.6 | 2.8 |
| 40 | 2.9 | 2.7 | 3.1 | 3.1 | 2.5 | 3.4 | 3.2 | 3.1 | 2.4 | 2.6 |
| 60 | 2.7 | 2.5 | 2.4 | 2.2 | 1.8 | 3.1 | 2.9 | 2.6 | 2.2 | 1.9 |
| 80 | 2.6 | 2.4 | 2.2 | 1.8 | 1.6 | 2.9 | 2.3 | 2 | 1.7 | 1.5 |
| 100 | 2.6 | 2.4 | 2.2 | 1.8 | 1.6 | 2.9 | 2.3 | 2 | 1.7 | 1.5 |
| 120 | 2.6 | 2.4 | 2.2 | 1.8 | 1.6 | 2.9 | 2.3 | 2 | 1.7 | 1.5 |

| Cantidad de adsorbente (g) | Promedio | | | | | Desviación estándar | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.610 | 1.242 | 1.858 | 2.536 | 3.037 | 0.610 | 1.242 | 1.858 | 2.536 | 3.037 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | | | | | |
| 0 | 3.85 | 3.85 | 3.85 | 3.85 | 3.85 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |
| 20 | 3.5 | 3.3 | 3.3 | 3.0 | 2.85 | 0.14 | 0.07 | 0.07 | 0.2 | 0.07 |
| 40 | 3.15 | 2.95 | 3.1 | 2.8 | 2.55 | 0.35 | 0.18 | 0.00 | 0.2 | 0.07 |
| 60 | 2.9 | 2.7 | 2.5 | 2.2 | 1.85 | 0.28 | 0.14 | 0.07 | 0.0 | 0.07 |
| 80 | 2.75 | 2.35 | 2.1 | 1.8 | 1.55 | 0.21 | 0.04 | 0.07 | 0.0 | 0.07 |
| 100 | 2.75 | 2.35 | 2.1 | 1.8 | 1.55 | 0.21 | 0.04 | 0.07 | 0.0 | 0.07 |
| 120 | 2.75 | 2.35 | 2.1 | 1.8 | 1.55 | 0.21 | 0.04 | 0.07 | 0.0 | 0.07 |

i) Condiciones iniciales

| | |
|--------------------------------|----------|
| Concentración inicial de Flúor | 9 mg/L |
| Tamaño de partícula | 0.212 mm |
| Volumen por jarra | 0.6 L |
| Revoluciones | 100 rpm |

j) Datos experimentales

| Cantidad de adsorbente (g) | Primera repetición | | | | | Segunda repetición | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.610 | 1.247 | 1.908 | 2.589 | 3.008 | 0.610 | 1.237 | 1.809 | 2.484 | 3.065 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | Concentración (mg/L) | | | | |
| 0 | 8.9 | 8.9 | 8.9 | 8.9 | 8.9 | 9.3 | 9.3 | 9.3 | 9.3 | 9.3 |
| 20 | 7.1 | 7.1 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 7.2 | 7.3 | 7 | 6.7 | 6.8 |
| 40 | 6.8 | 6.5 | 6.2 | 5.5 | 5.2 | 6.8 | 6.3 | 6.4 | 5.4 | 5.2 |
| 60 | 6.5 | 5.8 | 5.3 | 5.2 | 4.4 | 6.4 | 5.9 | 5.6 | 4.8 | 4.3 |
| 80 | 6.6 | 5.7 | 5.2 | 4.4 | 4.2 | 6.3 | 5.8 | 5.4 | 4.7 | 4.1 |
| 100 | 6.6 | 5.7 | 5.2 | 4.4 | 4.2 | 6.3 | 5.8 | 5.4 | 4.7 | 4.1 |
| 120 | 6.6 | 5.7 | 5.2 | 4.4 | 4.2 | 6.3 | 5.8 | 5.4 | 4.7 | 4.1 |

| Cantidad de adsorbente (g) | Promedio | | | | | Desviación estándar | | | | |
|----------------------------|----------------------|------|------|------|------|---------------------|------|------|------|------|
| | 0.61 | 1.24 | 1.86 | 2.54 | 3.04 | 0.61 | 1.24 | 1.86 | 2.54 | 3.04 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | | | | | |
| 0 | 9.1 | 9.1 | 9.1 | 9.1 | 9.1 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| 20 | 7.15 | 7.2 | 6.95 | 6.8 | 6.8 | 0.07 | 0.07 | 0.04 | 0.0 | 0.00 |
| 40 | 6.65 | 6.05 | 5.85 | 5.3 | 4.8 | 0.21 | 0.18 | 0.39 | 0.1 | 0.57 |
| 60 | 6.5 | 5.8 | 5.4 | 4.6 | 4.25 | 0.14 | 0.07 | 0.14 | 0.1 | 0.07 |
| 80 | 6.45 | 5.75 | 5.3 | 4.55 | 4.15 | 0.21 | 0.07 | 0.14 | 0.21 | 0.07 |
| 100 | 6.45 | 5.75 | 5.3 | 4.55 | 4.15 | 0.21 | 0.07 | 0.14 | 0.21 | 0.07 |
| 120 | 6.45 | 5.75 | 5.3 | 4.55 | 4.15 | 0.21 | 0.07 | 0.14 | 0.21 | 0.07 |

k) Condiciones iniciales

| | |
|--------------------------------|----------|
| Concentración inicial de Flúor | 4 mg/L |
| Tamaño de partícula | 0.212 mm |
| Volumen por jarra | 0.6 L |
| Revoluciones | 100 rpm |

l) Datos experimentales

| Cantidad de adsorbente (g) | Primera repetición | | | | | Segunda repetición | | | | |
|----------------------------|----------------------|------|------|------|------|----------------------|------|------|------|------|
| | 0.61 | 1.25 | 1.91 | 2.59 | 3.01 | 0.61 | 1.20 | 1.80 | 2.50 | 3.10 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | Concentración (mg/L) | | | | |
| 0 | 4.2 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.2 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 |
| 20 | 4.4 | 4.4 | 3.7 | 3.4 | 2.8 | 3.6 | 3.4 | 3.2 | 3.4 | 2.6 |
| 40 | 4.1 | 3.8 | 2.4 | 2.2 | 1.6 | 3.2 | 3.1 | 2.3 | 2.3 | 1.9 |
| 60 | 3.1 | 2 | 1.8 | 1.2 | 0.9 | 2.8 | 2.6 | 1.9 | 1.4 | 0.7 |
| 80 | 3.1 | 2 | 1.8 | 1.2 | 0.9 | 2.8 | 2.2 | 1.3 | 0.9 | 0.7 |
| 100 | 3.1 | 2 | 1.8 | 1.2 | 0.9 | 2.8 | 2.2 | 1.3 | 0.9 | 0.7 |

| Cantidad de adsorbente (g) | Promedio | | | | | Desviación estándar | | | | |
|----------------------------|----------------------|------|------|------|------|---------------------|------|------|------|------|
| | 0.61 | 1.24 | 1.86 | 2.54 | 3.04 | 0.61 | 1.24 | 1.86 | 2.54 | 3.04 |
| Tiempo (min) | Concentración (mg/L) | | | | | | | | | |
| 0 | 4.00 | 4.10 | 4.10 | 4.10 | 4.00 | 0.28 | 0.21 | 0.21 | 0.21 | 0.28 |
| 20 | 4 | 3.9 | 3.45 | 3.4 | 2.7 | 0.57 | 0.35 | 0.18 | 0.0 | 0.14 |
| 40 | 3.65 | 3.45 | 2.35 | 2.3 | 1.75 | 0.64 | 0.25 | 0.04 | 0.0 | 0.21 |
| 60 | 2.95 | 2.3 | 1.85 | 1.3 | 0.8 | 0.21 | 0.21 | 0.04 | 0.1 | 0.14 |
| 80 | 2.95 | 2.1 | 1.55 | 1.1 | 0.8 | 0.21 | 0.07 | 0.18 | 0.1 | 0.14 |
| 100 | 2.95 | 2.1 | 1.55 | 1.1 | 0.8 | 0.21 | 0.07 | 0.18 | 0.1 | 0.14 |

m) Condiciones finales

| Tamaño de partícula | Masa de adsorbente | Turbiedad |
|---------------------|--------------------|-----------|
| 0.71 mm | 5 g/L | 5.57 |
| 0.30 | 5 g/L | 5.83 |
| 0.212 | 5 g/L | 5.85 |

ANEXO N° 4
DATOS EXPERIMENTALES DE LAS ISOTERMAS DE LANGMUIR
Y FREUNDLICH DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera*

- a) Valores de condiciones de equilibrio para la construcción de isothermas de adsorción del cotiledón de moringa. tamaño de partícula 0.71 mm

| m (g) | Co (mg/L) | Ce (mg/L) | Qe (mg/g) | Eficiencia (%) |
|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| 0.61 | 9.1 | 7.35 | 1.72 | 19.23 |
| 1.24 | 9.1 | 6.35 | 1.33 | 30.22 |
| 1.86 | 9.1 | 6 | 1.00 | 34.07 |
| 2.42 | 9.1 | 5.9 | 0.81 | 35.71 |
| 3.04 | 9.1 | 5.65 | 0.68 | 37.91 |

- b) Datos experimentales linealizados de modelos isotérmicos de Langmuir y Freundlich para el cotiledón. tamaño de partícula 0.71 mm

| Langmuir | |
|-----------------|-------------|
| 1/ce | 1/Qe |
| 0.14 | 0.58 |
| 0.16 | 0.75 |
| 0.17 | 1 |
| 0.17 | 1.24 |
| 0.18 | 1.47 |

| Freundlich | |
|-------------------|---------------|
| ln(Ce) | ln(Qe) |
| 2.00 | 0.54 |
| 1.85 | 0.28 |
| 1.79 | 0 |
| 1.77 | -0.22 |
| 1.73 | -0.38 |

- c) Valores de condiciones de equilibrio para la construcción de isothermas de adsorción del cotiledón de moringa. tamaño de partícula 0.3 mm

| m (g) | Co (mg/L) | Ce (mg/L) | Qe (mg/g) | Eficiencia (%) |
|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| 0.60 | 9.4 | 7.10 | 2.29 | 24.47 |
| 1.21 | 9.4 | 6.55 | 1.42 | 30.32 |
| 1.81 | 9.4 | 6.25 | 1.04 | 33.51 |
| 2.47 | 9.4 | 6.10 | 0.81 | 35.64 |
| 3.00 | 9.4 | 5.80 | 0.72 | 38.30 |

- d) Datos experimentales linealizados de modelos isotérmicos de Langmuir y Freundlich para el cotiledón. tamaño de partícula 0.3 mm

| Langmuir | |
|-----------------|-------------|
| 1/ce | 1/Qe |
| 0.14 | 0.44 |
| 0.15 | 0.71 |
| 0.16 | 0.96 |
| 0.17 | 1.23 |
| 0.17 | 1.39 |

| Freundlich | |
|-------------------|---------------|
| ln(Ce) | ln(Qe) |
| 1.96 | 0.83 |
| 1.88 | 0.35 |
| 1.83 | 0.04 |
| 1.80 | -0.21 |
| 1.76 | -0.33 |

- e) Valores de condiciones de equilibrio para la construcción de isothermas de adsorción del cotiledón de moringa. tamaño de partícula 0.212 mm

| m (g) | Co (mg/L) | Ce (mg/L) | Qe (mg/g) | Eficiencia (%) |
|--------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| 0.60 | 9.05 | 7.20 | 1.85 | 20.44 |
| 1.22 | 9.05 | 6.65 | 1.18 | 26.52 |
| 1.81 | 9.05 | 6.25 | 0.93 | 30.94 |
| 2.41 | 9.05 | 5.80 | 0.82 | 36.46 |
| 3.00 | 9.05 | 5.56 | 0.70 | 38.52 |

- f) Datos experimentales linealizados de modelos isotérmicos de Langmuir y Freundlich para el cotiledón. tamaño de partícula 0.212 mm

| Langmuir | |
|-----------------|-------------|
| 1/ce | 1/Qe |
| 0.14 | 0.54 |
| 0.15 | 0.85 |
| 0.16 | 1.08 |
| 0.17 | 1.22 |
| 0.18 | 1.43 |

| Freundlich | |
|-------------------|---------------|
| ln(Ce) | ln(Qe) |
| 1.97 | 0.62 |
| 1.89 | 0.17 |
| 1.83 | -0.07 |
| 1.75 | -0.20 |
| 1.72 | -0.36 |

- g) Valores de condiciones de equilibrio para la construcción de isothermas de adsorción de las cáscaras de moringa. tamaño de partícula 0.71 mm

| m (g) | Co (mg/L) | Ce (mg/L) | Qe (mg/g) | Eficiencia (%) |
|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| 0.62 | 9.35 | 7.10 | 2.17 | 24.06 |
| 1.21 | 9.35 | 6.95 | 1.19 | 25.67 |
| 1.80 | 9.35 | 6.70 | 0.88 | 28.34 |
| 2.43 | 9.35 | 6.50 | 0.70 | 30.48 |
| 3.01 | 9.35 | 6.20 | 0.63 | 33.69 |

- h) Datos experimentales linealizados de modelos isotérmicos de Langmuir y Freundlich para las cáscaras. tamaño de partícula 0.71 mm

| Langmuir | |
|-----------------|-------------|
| 1/ce | 1/Qe |
| 0.14 | 0.46 |
| 0.14 | 0.84 |
| 0.15 | 1.13 |
| 0.15 | 1.42 |
| 0.16 | 1.59 |

| Freundlich | |
|-------------------|---------------|
| ln(Ce) | ln(Qe) |
| 1.96 | 0.77 |
| 1.94 | 0.18 |
| 1.90 | -0.13 |
| 1.87 | -0.35 |
| 1.82 | -0.47 |

- i) Valores de condiciones de equilibrio para la construcción de isothermas de adsorción de las cáscaras de moringa. tamaño de partícula 0.3 mm

| m (g) | Co (mg/L) | Ce (mg/L) | Qe (mg/g) | Eficiencia (%) |
|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| 0.61 | 8.9 | 6.7 | 2.23 | 25.28 |
| 1.21 | 8.9 | 6.3 | 1.32 | 29.78 |
| 1.80 | 8.9 | 5.8 | 1.05 | 35.39 |
| 2.45 | 8.9 | 5.3 | 0.88 | 40.45 |
| 3.08 | 8.9 | 4.8 | 0.79 | 45.60 |

- j) Datos experimentales linealizados de modelos isotérmicos de Langmuir y Freundlich para las cáscaras. tamaño de partícula 0.3 mm

| Langmuir | |
|-----------------|-------------|
| 1/ce | 1/Qe |
| 0.15 | 0.45 |
| 0.16 | 0.76 |
| 0.17 | 0.96 |
| 0.19 | 1.13 |
| 0.21 | 1.26 |

| Freundlich | |
|-------------------|---------------|
| ln(Ce) | ln(Qe) |
| 1.91 | 0.80 |
| 1.83 | 0.28 |
| 1.75 | 0.05 |
| 1.67 | -0.12 |
| 1.58 | -0.23 |

- k) Valores de condiciones de equilibrio para la construcción de isothermas de adsorción de las cáscaras de moringa. tamaño de partícula 0.212 mm

| m (g) | Co (mg/L) | Ce (mg/L) | Qe (mg/g) | Eficiencia (%) |
|--------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| 0.61 | 9.1 | 6.5 | 2.61 | 29.12 |
| 1.24 | 9.1 | 5.8 | 1.62 | 36.81 |
| 1.80 | 9.1 | 5.3 | 1.27 | 41.76 |
| 2.40 | 9.1 | 4.6 | 1.14 | 50.00 |
| 3.04 | 9.1 | 4.2 | 0.98 | 54.40 |

- l) Datos experimentales linealizados de modelos isotérmicos de Langmuir y Freundlich para las cáscaras. tamaño de partícula 0.21 mm

| Langmuir | |
|-----------------|-------------|
| 1/ce | 1/Qe |
| 0.16 | 0.38 |
| 0.17 | 0.62 |
| 0.19 | 0.79 |
| 0.22 | 0.88 |
| 0.24 | 1.02 |

| Freundlich | |
|-------------------|---------------|
| ln(Ce) | ln(Qe) |
| 1.86 | 0.96 |
| 1.75 | 0.48 |
| 1.67 | 0.24 |
| 1.52 | 0.13 |
| 1.42 | -0.02 |