



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BIOSORTIVA DE LA CÁSCARA DE BANANO EN
LA ELIMINACIÓN DE COBRE DIVALENTE (Cu^{+2}) DE UNA SOLUCIÓN DE SULFATO DE COBRE
PENTAHIDRATADO, A ESCALA LABORATORIO, MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA VISIBLE**

Carlos Guillermo Mendoza Meza

Asesorado por el Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez

Guatemala, abril de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BIOSORTIVA DE LA CÁSCARA DE BANANO EN
LA ELIMINACIÓN DE COBRE DIVALENTE (Cu^{+2}) DE UNA SOLUCIÓN DE SULFATO DE COBRE
PENTAHIDRATADO, A ESCALA LABORATORIO, MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA VISIBLE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS GUILLERMO MENDOZA MEZA
ASESORADO POR EL ING. VÍCTOR MANUEL MONZÓN VALDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADORA	Inga. Adela María Marroquín Gonzáles
EXAMINADORA	Inga. Cinthya Patricia Ortíz Quiroa
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López



HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BIOSORTIVA DE LA CÁSCARA DE BANANO EN LA ELIMINACIÓN DE COBRE DIVALENTE (Cu^{+2}) DE UNA SOLUCIÓN DE SULFATO DE COBRE PENTAHIDRATADO, A ESCALA LABORATORIO, MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA VISIBLE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 18 de noviembre de 2014.

Carlos Guillermo Mendoza Meza



Guatemala, 22 de enero de 2016

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

Respetable Ingeniero Wong:

Con un cordial saludo me dirijo a su persona para informarle que he asesorado y aprobado el informe final del Trabajo de Graduación titulado: "EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BIOSORTIVA DE LA CÁSCARA DE BANANO EN LA ELIMINACIÓN DE COBRE DIVALENTE (Cu^{+2}) DE UNA SOLUCIÓN DE SULFATO DE COBRE PENTAHIDRATADO, A ESCALA LABORATORIO, MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA VISIBLE", elaborado por el estudiante de Ingeniería Química Carlos Guillermo Mendoza Meza con número de carné 201114267. Considero que el informe satisface los requisitos exigidos; por lo que solicito se sirva remitirlo para su respectiva revisión.

Agradezco la atención a la presente.

Atentamente,

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
ASESOR

Ing. Qco. Víctor Manuel Monzón Valdez
Colegiado No. 656

PROGRAMA DE INGENIERÍA
QUÍMICA ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Período 2009 - 2012





Guatemala, 03 de marzo de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.010.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **092-2014** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Carlos Guillermo Mendoza Meza**.
Identificado con número de carné: **2011-14267**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.


Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BIOSORTIVA DE LA CÁSCARA DE BANANO EN LA ELIMINACIÓN DE COBRE DIVALENTE (Cu⁺²) DE UNA SOLUCIÓN DE SULFATO DE COBRE PENTAHIDRATADO, A ESCALA LABORATORIO, MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA VISIBLE

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Víctor Manuel Monzón Valdez**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Inga Mercedes Esther Roquel Chávez
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.019.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **CARLOS GUILLERMO MENDOZA MEZA** titulado: **"EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BIOSORTIVA DE LA CÁSCARA DE BANANO EN LA ELIMINACIÓN DE COBRE DIVALENTE (Cu⁺²) DE UNA SOLUCIÓN DE SULFATO DE COBRE PENTAHIDRATADO, A ESCALA LABORATORIO, MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA VISIBLE"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, abril 2016

Cc: Archivo
CSWD/ale



Universidad de San Carlos
De Guatemala

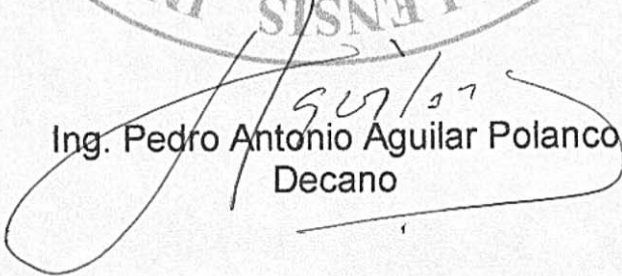


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.153.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BIOSORTIVA DE LA CÁSCARA DE BANANO EN LA ELIMINACIÓN DE COBRE DIVALENTE (Cu^{+2}), DE UNA SOLUCIÓN DE SULFATO DE COBRE PENTAHIDRATADO, A ESCALA LABORATORIO, MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA VISIBLE**, presentado por el estudiante universitario; **Carlos Guillermo Mendoza Meza**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, abril 2016

/cc



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser el centro de mi vida y la razón de todos los éxitos que he cosechado hasta el momento.
- Mi madre** Alma Lucrecia Meza, por ser esa mujer que amo, que me hizo ser como soy; por darme la vida, su amor y apoyo incondicional.
- Mi padre** Carlos Joel Mendoza, por aconsejarme, apoyarme y guiarme siempre que lo necesité.
- Mis hermanos** Lissa y Diego Mendoza Meza, por ser mis compañeros de viaje en esta vida y darme siempre lo mejor de ellos.
- Mis tíos** Liliana y Guillermo Meza, Ramiro Rodríguez y Marcia de Rodríguez, por brindarme su apoyo y cariño en todo momento.
- Mis primos** Por haberme brindado su apoyo, tiempo y cariño a lo largo de mi vida.
- Mi abuela** Maria Teresa Castillo (q. e. p. d.), por haber sido mi segunda madre durante los primeros años de mi vida; la base quien soy ahora.

Los antigüenos

Esas personas que siempre han estado a mi lado, que me han brindado su apoyo y cariño; mis hermanos de otra madre.

Mis amigos de la Facultad

Conocerlos y compartir este camino ha sido un placer para mí; no lo hubiera logrado sin cada uno de ellos.

Víctor Manuel Monzón Valdez

Por haberme guiado y ayudado a cumplir mi sueño, brindándome sus conocimientos y tiempo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindarme cada uno de los recursos que utilicé durante mi carrera y ser una importante influencia en mi vida.
Facultad de Ingeniería	Por haber sido mi segundo hogar durante los años de estudio y haberme dado el conocimiento necesario para ser profesional.
La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla	Por haberme brindado la oportunidad de realizar un intercambio académico en 2013 y haber ayudado a trazar mi camino como profesional.
Mi coasesora	Ingrid Lorena Benítez Pacheco, por haberme brindado su ayuda en la interpretación de datos.
Ing. Cesar Ariel Villela Rodas	Por haberme abierto las puertas del laboratorio en donde llevé a cabo la parte experimental de la presente investigación.
Inga. Telma Maricela Cano Morales	Por haberme prestado las instalaciones del LIEXVE y LAFIQ para avanzar en la parte experimental de la presente investigación.

Inga. Mercedes
Esther Roquel

Por haberse tomado el tiempo de revisar el presente informe y brindarme sus observaciones para mejorarlo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
Hipótesis	XVIII
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Adsorción.....	3
2.1.1. Adsorción física	3
2.1.2. Adsorción química	4
2.1.3. Biosorción.....	4
2.1.4. Desorción.....	4
2.1.5. Isoterma de adsorción	4
2.1.6. Isoterma de Freundlich	4
2.1.7. Isoterma de Langmuir	5
2.2. Equilibrio de complejos.....	6
2.2.1. Carga de número de coordinación.....	6
2.2.2. Agentes acomplejantes o ligantes	7
2.2.3. Sulfato de cobre pentahidratato.....	7
2.3. Espectrofotometría	7
2.3.1. Espectrofotometría ultravioleta–visible	7

2.3.2.	Transmitancia.....	8
2.3.3.	Absorbancia	8
2.3.4.	Ley de Beer–Lamberto Ley de Beer.....	8
2.3.5.	Colorimetría.....	9
2.4.	Lignina.....	9
2.5.	Equilibrio ácido–base	9
2.5.1.	Teoría de Arrhenius.....	10
2.5.2.	Teoría de Bronsted Lowry	10
2.5.3.	Hidrólisis.....	10
2.5.4.	Hidrólisis ácido–base	10
2.6.	Distribución de carga parcial	11
2.6.1.	Intercambio iónico	11
2.7.	Metales pesados	11
2.7.1.	Porcentaje de eliminación de cobre divalente (Cu ⁺²).....	12
2.8.	Banano (<i>Musa x paradisiaca</i>).....	12
2.8.1.	Banano en Guatemala	12
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	13
3.1.	Variables	13
3.1.1.	Variables físicas	13
3.1.2.	Variables químicas	13
3.1.3.	Evaluación de un método espectrofotométrico para la determinación de la concentración de cobre	14
3.1.4.	Eliminación de Cu ⁺² mediante biosorción de la cáscara de banano.....	14
3.2.	Delimitación de campo de estudio	15
3.2.1.	Fundamentos	15

3.2.2.	Lugar de realización	16
3.2.3.	Viabilidad de la investigación.....	16
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	16
3.4.	Recursos materiales disponibles	17
3.4.1.	Equipos auxiliares.....	17
3.4.2.	Instrumentos de medición.....	17
3.4.3.	Cristalería	18
3.4.4.	Reactivos	18
3.4.5.	Materiales	19
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	19
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	19
3.6.1.	Metodología experimental, basada en el método de colorimetría, para la determinación de un modelo matemático que relacione la concentración de cobre divalente (Cu^{+2}) en solución con la absorbancia medida mediante espectrofotometría visible	19
3.6.2.	Metodología experimental para la evaluación de la capacidad biosortiva de la cáscara de banano al variar los gramos de biosorbente.....	20
3.6.3.	Metodología experimental para la evaluación de la capacidad biosortiva de la cáscara de banano al variar el tiempo de contacto	21
3.6.4.	Metodología experimental para la evaluación de la capacidad biosortiva de la cáscara de banano al variar la temperatura de trabajo	22
3.6.5.	Metodología experimental para la evaluación de la capacidad biosortiva de la cáscara de banano al variar el pH de la solución.....	23

3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	24
3.7.1.	Metodología de cálculo de porcentaje de reducción de cobre divalente en solución luego de aplicar el método	25
3.7.2.	Elaboración de las isotermas de adsorción de Freundlich y Langmuir	25
3.8.	Análisis estadístico.....	26
4.	RESULTADOS.....	27
4.1.	Curva de calibración.....	27
4.2.	Cantidad de cáscara de banano de 0,6 mm.....	28
4.2.1.	Análisis estadístico de la cantidad de cáscara de banano 0,6 mm	29
4.3.	Cantidad de cáscara de banano de 1,68 mm.....	30
4.3.1.	Análisis estadístico de la cantidad de cáscara de banano 1,68 mm	31
4.4.	Cantidad de cáscara de banano de 2 mm.....	32
4.4.1.	Análisis estadístico de la cantidad de cáscara de banano 2 mm	34
4.5.	Tiempo de contacto.....	35
4.5.1.	Análisis estadístico del tiempo de contacto	36
4.6.	Temperatura.....	37
4.6.1.	Análisis estadístico de la temperatura	39
4.7.	pH.....	40
4.7.1.	Análisis estadístico del pH.....	41
4.8.	Isoterma de Freundlich.....	42
4.9.	Isoterma de Langmuir	44

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	47
CONCLUSIONES	55
RECOMENDACIONES.....	57
BIBLIOGRAFÍA.....	59
APÉNDICES	61
ANEXOS	72

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Isoterma de Freundlich.....	5
2.	Isoterma de Langmuir	6
3.	Curva de calibración del método espectrofotométrico utilizando una longitud de onda de 602 nm.....	27
4.	Porcentaje de remoción de cobre divalente en función de la cantidad de cáscara de banano adicionada de 0,6 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 3 minutos y un pH = 11	28
5.	Porcentaje de remoción de cobre divalente en función de la cantidad de cáscara de banano adicionada de 1,68 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 3 minutos y un pH = 11	30
6.	Porcentaje de remoción de cobre divalente en función de la cantidad de cáscara de banano adicionada de 2 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 3 minutos y un pH = 11	33
7.	Porcentaje de remoción de cobre divalente en función del tiempo de contacto, adicionando 0,2 g de cáscara de banano de 0,6 mm a 25 °C y un pH = 11	35
8.	Porcentaje de remoción de cobre divalente en función de la temperatura de operación, adicionando 0,2 g de cáscara de banano de 0,6 mm con un tiempo de contacto de 3 minutos y un pH = 11.....	38
9.	Porcentaje de remoción de cobre divalente en función del pH, adicionando 0,2 g de cáscara de banano de 0,6 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 3 minutos	40

10.	Isoterma de Freundlich linealizada para el equilibrio de adsorción, cobre divalente–cáscara de banano, utilizando 50 mg de cáscara de banano de 0,6 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 50 minutos a pH = 11.....	43
11.	Isoterma de Langmuir linealizada para el equilibrio de adsorción, cobre divalente–cáscara de banano, utilizando 50 mg de cáscara de banano de 0,6 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 50 minutos a pH = 11.....	44

TABLAS

I.	Definición operacional de las variables para la elaboración de la curva de calibración.....	14
II.	Definición operacional de las variables de la biosorción de la cáscara de banano en la eliminación del cobre divalente.....	15
III.	Definición de factores constantes y medición de absorbancia con distintas variables para cada tratamiento.....	24
IV.	Análisis de varianza de la cantidad de cáscara de banano de 0,6 mm.....	29
V.	Análisis de varianza de la cantidad de cáscara de banano de 1,68 mm.....	31
VI.	Análisis de varianza de la cantidad de cáscara de banano de 2 mm....	34
VII.	Análisis de varianza del tiempo de contacto	36
VIII.	Análisis de varianza de la temperatura	39
IX.	Análisis de varianza de del pH.....	41

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Absorbancia
g_{ad}	Cantidad de gramos biosorbente (Isotermas) (g)
g	Cantidad de gramos de cáscara de banano (g)
x	Capacidad de adsorción (Isoterma de Freundlich)
q	Capacidad de adsorción (Isoterma de Langmuir)
Ca	Concentración cobre divalente (Isotermas) (mol/L)
Cu_o	Concentración inicial de cobre divalente (g/L)
Cu_f	Concentración final de cobre divalente (g/L)
F_{crítica}	F crítica de Fischer
F	F de Fischer
H_a	Hipótesis alternativa
H₀	Hipótesis nula
m	Metro
mg	Miligramo
P	Probabilidad
α	Porcentaje de error en Anova
%R	Porcentaje de remoción de cobre divalente
RPM	Revoluciones por minuto
Ø	Tamaño de partícula (mm)
T	Temperatura de trabajo (°C)
t	Tiempo de contacto (min)

GLOSARIO

Adsorbato	Sustancia que se adsorbe (pega) en la superficie de otra llamada comúnmente adsorbente.
Adsorbente	Material que provee una superficie sobre la que sucede el proceso físico – químico de adsorción.
Agente quelante	Sustancia que forma complejos con iones de metales pesados.
Biosorbente	Cualquier tipo de material biológico que tiene una afinidad por los contaminantes orgánicos e inorgánicos.
Celda	Tubo pequeño de sección circular o cuadrada, cerrado en un extremo, fabricado en vidrio, plástico o cuarzo, y diseñado para mantener las muestras durante los experimentos de espectroscopia.
Complejo	Estructura molecular que usualmente se encuentra formada por un átomo central (metal) enlazado a un arreglo ordenado de otro grupo de átomos que lo rodean llamados ligandos.
Espectrofotómetro	Instrumento utilizado en el análisis químico que, mediante una longitud de onda definida previamente,

sirve para medir, en términos generales, la absorbancia de una solución.

Estado de oxidación Indica el grado de oxidación de un átomo que forma parte de un compuesto u otra especie química.

Extracto etéreo Es el conjunto de sustancias de un alimento que se extraen con éter etílico (es decir ésteres de los ácidos grasos, fosfolípidos, lecitinas, esteroides, ceras, ácidos grasos libres, y otros).

Ligando Molécula o ion que se une a un átomo de metal central para formar un complejo de coordinación.

Oxidación Proceso químico en donde un elemento cede electrones y por lo tanto, aumenta su estado de oxidación.

Quelatos Complejos formados por la unión de un metal y un compuesto que contiene dos o más ligandos potenciales.

Reducción Proceso químico en donde un elemento gana electrones y por lo tanto, disminuye su estado de oxidación.

Secado Proceso que consiste en la eliminación de agua de un sólido, líquido o gas mediante un horno de secado.

Tamizado

Método físico para separar mezclas de dos sólidos formados por partículas de tamaño diferente.

RESUMEN

En este trabajo de graduación se realizó la evaluación de la capacidad biosortiva de la cáscara de banano en la eliminación de cobre divalente (Cu^{+2}) de una solución de sulfato de cobre pentahidratado mediante espectrofotometría visible. Los pilares de esta investigación consistieron en la determinación del mayor porcentaje de remoción de cobre divalente (Cu^{+2}) posible y en la variación de distintas propiedades físicas y químicas durante la experimentación. Por tal razón, con la finalidad de determinar las variables adecuadas de funcionamiento del método de biosorción propuesto, se varió la cantidad de biosorbente, el tamaño de partícula, tiempo de contacto, pH y la temperatura de trabajo. Cabe destacar que la experimentación y la obtención de resultados se llevaron a cabo a escala laboratorio.

El procedimiento consistió en la selección del tipo de cáscara de banano (*Musa x Paradisiaca*) llamado Gran Enano (*Musa Cavendishii*). Esta fue sometida a un secado continuo en un secador transversal de bandejas a una temperatura y tiempo adecuado, para luego triturar y homogenizar el tamaño de partícula mediante tamizado. Por otro lado, se llevó a cabo el barrido, elección de longitud de onda y curva de calibración para realizar las mediciones correspondientes del método espectrofotométrico propuesto, mediante un espectrofotómetro UV-visible.

Por último, al realizar las mediciones correspondientes, se cuantificaron los valores de las variables estudiadas y se realizó el análisis estadístico de los datos mediante el método de análisis de varianzas Anova.

Cabe destacar que con base en los resultados obtenidos del porcentaje de remoción de cobre divalente (Cu^{+2}) luego de la experimentación, fue de aproximadamente 12 %. Se concluye que el método evaluado en la presente investigación es aceptable y funcional para las condiciones propuestas de cantidad de biosorbente, tamaño de partícula, tiempo de contacto, pH y temperatura.

OBJETIVOS

General

Evaluar la capacidad biosortiva de la cáscara de banano en la eliminación de cobre divalente (Cu^{+2}) de una solución de sulfato de cobre pentahidratado.

Específicos

1. Evaluar un método espectrofotométrico para determinar la concentración de cobre divalente en una solución de sulfato de cobre pentahidratado.
2. Determinar la cantidad de cáscara de banano para lograr la mayor remoción de cobre divalente (Cu^{+2}) de la solución de sulfato de cobre pentahidratado, en el rango de aplicación del método utilizado.
3. Determinar el tiempo de contacto para lograr la mayor remoción de cobre divalente (Cu^{+2}) de la solución de sulfato de cobre pentahidratado, en el rango de aplicación del método utilizado.
4. Determinar la temperatura para lograr la mayor remoción de cobre divalente (Cu^{+2}) de la solución de sulfato de cobre pentahidratado, en el rango de aplicación del método utilizado.
5. Determinar el pH para lograr la mayor remoción de cobre divalente (Cu^{+2}) de la solución de sulfato de cobre pentahidratado, en el rango de aplicación del método utilizado.

6. Analizar el comportamiento de la biosorción del cobre divalente adsorbido mediante la isoterma de Freundlich.
7. Analizar el comportamiento de la biosorción del cobre divalente adsorbido mediante la isoterma de Langmuir.
8. Determinar qué modelo se ajusta mejor al comportamiento de la biosorción de cobre divalente (Cu^{+2}) entre las isotermas analizadas.

Hipótesis

La biosorción del cobre divalente (Cu^{+2}) por la cáscara de banano, reducirá la concentración de cobre en la solución de sulfato de cobre pentahidratado.

- Hipótesis nula: la cantidad de biosorbente adicionada no incide significativamente en la remoción de cobre divalente (Cu^{+2}) de la solución de sulfato de cobre pentahidratado.
- Hipótesis alternativa: la cantidad de biosorbente adicionada incide significativamente en la remoción de cobre divalente (Cu^{+2}) de la solución de sulfato de cobre pentahidratado.
- Hipótesis nula: el tiempo de contacto no incide significativamente en la remoción de cobre divalente (Cu^{+2}) de la solución de sulfato de cobre pentahidratado.

- Hipótesis alternativa: el tiempo de contacto incide significativamente en la remoción de cobre divalente (Cu^{+2}) de la solución de sulfato de cobre pentahidratado.
- Hipótesis nula: la temperatura no incide significativamente en la remoción de cobre divalente (Cu^{+2}) de la solución de sulfato de cobre pentahidratado.
- Hipótesis alternativa: la temperatura incide significativamente en la remoción de cobre divalente (Cu^{+2}) de la solución de sulfato de cobre pentahidratado.
- Hipótesis nula: el pH no incide significativamente en la remoción de cobre divalente (Cu^{+2}) de la solución de sulfato de cobre pentahidratado.
- Hipótesis alternativa: el pH incide significativamente en la remoción de cobre divalente (Cu^{+2}) de la solución de sulfato de cobre pentahidratado.

INTRODUCCIÓN

La biosorción es una tecnología emergente que surge como respuesta específica al aumento de contaminación de los recursos hídricos. Consiste en la captación de metales mediante una biomasa completa (viva o muerta), a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico.

Estudios recientes han demostrado que la cáscara de banano (*Musa x paradisiaca*) posee una alta capacidad biosorbente de metales pesados; su estructura química se encuentra formada, principalmente por lignina. Esta es uno de los polímeros más abundantes en las plantas y es utilizada en varios procesos en la industria. Además, la superficie de la cáscara de banano se encuentra cargada negativamente, debido a los grupos carbonilo e hidroxilo, los cuales favorecen y facilitan la captación de metales pesados por un mecanismo de adsorción o intercambio iónico.

Tomando como base lo anterior, el presente trabajo tiene como finalidad la evaluación de un método experimental para la eliminación de un metal pesado utilizando la cáscara de banano (*Musa x paradisiaca*), a escala laboratorio. Esto mediante una solución de concentración conocida de sulfato de cobre pentahidratado, acomplejado con una solución de amoníaco para evaluar los resultados mediante espectrofotometría visible.

1. ANTECEDENTES

En Guatemala no se han llevado a cabo investigaciones sobre la capacidad biosortiva de la cáscara de banano en la eliminación de cobre divalente (Cu^{+2}). Por ello, esta investigación es de gran valor para la búsqueda de soluciones amigables con el medio ambiente, que ayuden a la descontaminación de recursos hídricos por cobre.

Por otro lado, como estudio complementario asociado a la presente investigación, Milena Boniolo, Doctora en Ciencias Químicas por la Universidad Federal de São Carlos en São Paulo, dirigió una investigación en la que emplea cáscara de banano para descontaminar aguas con metales pesados de una forma eficaz y barata. Ella se dio cuenta de la gran cantidad de cáscara de banano que se desechaba en el Gran São Paulo, siendo de aproximadamente cuatro toneladas de cáscara de banano a la semana solamente en restaurantes. Esto evidenció la necesidad de buscar una solución viable al problema.

El método se basa en el principio clásico de la química de la atracción entre los opuestos. La cáscara de banano presenta un gran número de moléculas con carga negativa en su superficie que atraen a los metales pesados con carga positiva. El procedimiento consiste en dejar secar al sol, durante una semana, las cáscaras de banano. Una vez seco, el material es triturado y pasado por un tamiz especial que asegure un tamaño uniforme de las partículas. El resultado es un polvo fino que se añade al agua contaminada de forma que por cada 100 ml de agua se emplean 5 mg de polvo de banano.¹

¹ RODRIGUEZ BONIOLO, Milena. *Biossorção de urânio nas cascas de banana*. p. 37.

“Estudios reflejan que tasa de descontaminación obtenida se acerca al 65 %. Dedicando varias iteraciones es posible alcanzar niveles más altos de limpieza. El método, que fue presentado como tesis investigadora en el Instituto para la Energía y la Investigación Nuclear (IPEN) utilizaba agua contaminada con uranio. Sin embargo, también se ha mostrado altamente eficaz con otros metales más comunes como el cadmio, plomo o níquel. ”²

² RODRIGUEZ BONIOLO, Milena. *Biossorção de urânio nas cascas de banana*. p. 38.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Adsorción

“Se define como un fenómeno superficial, se observa la tendencia de un componente a concentrarse en la interfase (adsorbato), donde las propiedades de la interfase y la composición de esta, son diferentes a cualquiera de las fases puras.”³

El proceso de adsorción de un átomo y molécula es uno de los principales métodos. En él las interfases de alta energía pueden modificarse para disminuir la energía total del sistema.

La adsorción puede ocurrir en cualquier tipo de fase (L-G, G-S, L-S), pero no se puede generalizar el comportamiento de las interfaces. Por ello se hace necesario un análisis exhaustivo para entender el comportamiento.

2.1.1. Adsorción física

“Es debida a las fuerzas de Van der Waals y la molécula adsorbida no está fija en un lugar específico de la superficie, y por ello es libre de trasladarse en la superficie.”⁴

³ KATZ, Miguel. *Fisicoquímica de superficies*. p. 41.

⁴ *Ibíd.*

2.1.2. Adsorción química

En esta adsorción existen enlaces fuertes entre el adsorbato y los centros activos del adsorbente. Por ello, la molécula no puede moverse.

2.1.3. Biosorción

Se refiere a la captación de metales pesados que lleva a cabo una biomasa completa (viva o muerta). Esto a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico.

2.1.4. Desorción

Se refiere al proceso contrario a la adsorción. Es la eliminación de un material desde un medio adsorbente, usualmente para recuperar material.

2.1.5. Isoterma de adsorción

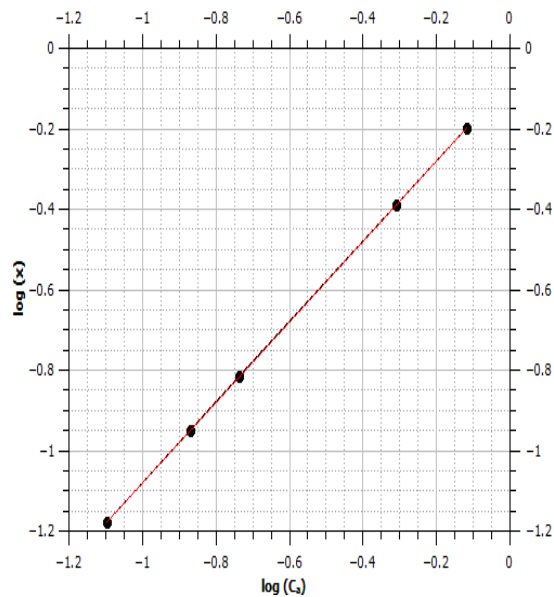
Describe el equilibrio de la adsorción de un material en una superficie a temperatura constante. Representa la cantidad de material unido a la superficie (el sorbato) como una función del material presente en la fase gas o en la disolución. Las isotermas de adsorción se usan con frecuencia como modelos experimentales.

2.1.6. Isoterma de Freundlich

Básicamente es una curva que relaciona la concentración de un soluto en la superficie de un adsorbente, con la concentración del soluto en el líquido con el que está en contacto. Además, se puede definir la ecuación matemática de la

isoterma mediante la relaciona la masa de adsorbato por masa de adsorbente. Definiendo la presión y concentración de equilibrio del adsorbato en solución con dos constantes para un adsorbato y un adsorbente dados a una temperatura particular.

Figura 1. **Isoterma de Freundlich**

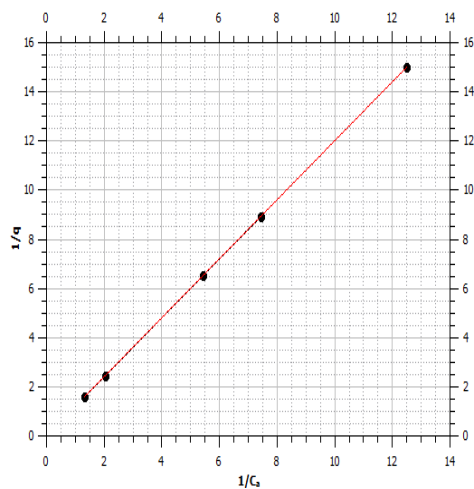


Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot.

2.1.7. **Isoterma de Langmuir**

Es una curva que describe, de manera cuantitativa, el depósito de una gran capa de moléculas sobre una superficie adsorbente. Esto como una función de la concentración del material adsorbido en el líquido con el que está en contacto.

Figura 2. **Isoterma de Langmuir**



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot.

2.2. **Equilibrio de complejos**

Cuando un ion metálico o de cualquier sustancia se combina con un grupo donador de un par de electrones, el compuesto resultante se conoce como un compuesto complejo o de coordinación.

2.2.1. **Carga de número de coordinación**

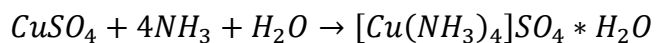
La carga del complejo se determinará por el balance o suma de las cargas positivas y negativas con respecto al átomo central y los ligantes alrededor. Cuando los ligantes se coordinan al metal, lo cual ocurre en la llamada esfera de coordinación, el átomo del ligante que se une directamente con el metal se denomina átomo donador. El número total de átomos que actúan como donadores determina el número de coordinación, que con frecuencia depende del tamaño del ion metálico y de los ligantes que lo rodean.

2.2.2. Agentes acomplejantes o ligantes

Son las moléculas o los iones que rodean a un ion metálico en un complejo. Normalmente son aniones o moléculas polares y tienen un par de electrones de valencia no compartidos como ocurre en H₂O, X, NH₃, PR₃, RCN, y otros.

2.2.3. Sulfato de cobre pentahidratato

Es el producto de la reacción química entre el sulfato de cobre (II) anhidro y agua. Se caracteriza por su color turquesa y sus rápidos cambios de temperatura al agregarle más agua. Su fórmula molecular es CuSO₄ * 5H₂O.



2.3. Espectrofotometría

El término se refiere al uso de la luz para medir las concentraciones de sustancias químicas. Cuando una molécula absorbe un fotón, su energía se incrementa, se dice que pasa a un estado excitado. Si por el contrario emite un fotón, su energía disminuye. El estado de menor energía de una molécula se denomina estado basal o fundamental.

2.3.1. Espectrofotometría ultravioleta–visible

Utiliza radiación electromagnética (luz) de las regiones visibles, ultravioleta cercana (UV) e infrarroja cercana (NIR) del espectro electromagnético, es decir, una longitud de onda entre 380 nm y 780 nm. Se utiliza extensivamente en laboratorios de química y bioquímica para determinar pequeñas cantidades de

cierta sustancia; las trazas de metales en aleaciones o la concentración de cierto medicamento que puede llegar a ciertas partes del cuerpo.

2.3.2. Transmitancia

La transmitancia óptica se refiere a la cantidad de luz que atraviesa un cuerpo, en una determinada longitud de onda.

2.3.3. Absorbancia

Se define como la porción de luz absorbida por un cuerpo traslúcido cuando un haz de luz incide sobre él. A mayor cantidad de luz absorbida, mayor será la absorbancia del cuerpo, y menor cantidad de luz será transmitida por dicho cuerpo.

2.3.4. Ley de Beer–Lamberto Ley de Beer

La ley establece que la absorbancia es proporcional a la concentración de las especies absorbentes. Dicha ley se verifica muy bien en un rango definido de concentraciones ($\leq 0,01$ M). Las desviaciones aparentes de la ley de Beer en soluciones más concentradas pueden atribuirse a cambios en las propiedades de las especies absorbentes de la solución. Conforme una solución se vuelve más concentrada, las moléculas de soluto interactúan entre sí debido a su proximidad, modificando sus propiedades de absorber la luz.

2.3.5. Colorimetría

Es la ciencia que estudia la medida de los colores y que desarrolla métodos para cuantificar el color, dada la existencia de una necesidad de estandarizar el color para clasificarlo y reproducirlo.

2.4. Lignina

Es una sustancia que aparece en los tejidos leñosos de los vegetales y que mantiene unidas las fibras de celulosa que los componen; constituye 25 % de la madera y 8,21 % de la cáscara de banano. Este componente realiza múltiples funciones que son esenciales para la vida de las plantas. Por ejemplo, proporciona rigidez a la pared celular.

Los tejidos lignificados resisten el ataque de los microorganismos, impidiendo la penetración de las enzimas destructivas en la pared celular. Es un polímero insoluble en ácidos y soluble en álcalis fuertes como el hidróxido de sodio, presenta un elevado peso molecular que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos.

2.5. Equilibrio ácido-base

La acidez y la basicidad constituyen el conjunto de propiedades características de dos importantes grupos de sustancias químicas: ácidos y bases. Las ideas actuales sobre tales conceptos químicos consideran los ácidos como dadores de protones y las bases comoceptoras. En los procesos en los que interviene un ácido, a su vez, lo hace su base conjugada, que es la sustancia que recibe el protón cedido por el ácido. Tales procesos se denominan reacciones ácido-base.

2.5.1. Teoría de Arrhenius

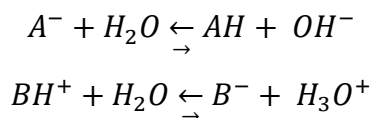
Un ácido es un compuesto que en disolución acuosa produce protones y una base es toda aquella sustancia que en un medio acuoso se disocia dando aniones denominados hidroxilos.

2.5.2. Teoría de Bronsted Lowry

Un ácido es toda sustancia capaz de ceder uno o más protones a otra molécula. Una base, por su parte, es una sustancia capaz de aceptar uno o más protones de otra molécula.

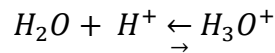
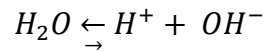
2.5.3. Hidrólisis

Se define como una reacción química entre una molécula de agua y otra molécula. En ella, la molécula de agua se divide y sus átomos pasan a formar parte de otra especie química. Es una reacción muy importante en muchos procesos biológicos y en la industria de los procesos químicos en general.



2.5.4. Hidrólisis ácido-base

En esta reacción, el agua se divide en el ion hidroxilo (OH^-) y el ion H^+ , el cual es inmediatamente hidratado para formar el ion hidronio (H_3O^+). Es una reacción que sucede espontáneamente en agua pura. El equilibrio químico de esta reacción se denomina autoprotólisis.



2.6. Distribución de carga parcial

Al combinar dos átomos ocurre una transferencia de electrones que depende principalmente de la diferencia de electronegatividades entre los átomos. El átomo con el valor más alto de electronegatividad atrae los electrones adquiriendo una carga parcial negativa, disminuyendo su electronegatividad, y el otro adquiere una carga parcial positiva con lo que su electronegatividad aumenta. Este proceso continúa hasta que se da una igualación de electronegatividades.

2.6.1. Intercambio iónico

Es una operación de separación basada en la transferencia de materia fluido-sólido. Implica la transferencia de uno o más iones de la fase fluida al sólido por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga. Estas se encuentran unidas por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales.

La eficacia del proceso depende del equilibrio sólido-fluido y de la velocidad de transferencia de materia. Los sólidos suelen ser de tipo polimérico, siendo los más habituales los basados en resinas sintéticas.

2.7. Metales pesados

Son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. Tienen aplicación directa en numerosos procesos de producción de bienes y servicios. Los más importantes son: arsénico (As), cadmio (Cd),

cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), estaño (Sn) y cinc (Zn).

2.7.1. Porcentaje de eliminación de cobre divalente (Cu⁺²)

El porcentaje de eliminación de cobre divalente (Cu⁺²) relaciona la concentración de cobre al inicio con la concentración de cobre, luego de los distintos tratamientos con cáscara de banano.

$$\%R = \frac{Cu_o - Cu_f}{Cu_o}$$

[Ec. 1]

2.8. Banano (*Musa x paradisiaca*)

El banano no es un árbol, sino una megaforbia; una hierba perenne de gran tamaño. Como las demás especies de *Musa*, carece de verdadero tronco. En su lugar, posee vainas foliares que se desarrollan formando estructuras llamadas pseudotallos, similares a fustes verticales de hasta 30 cm de diámetro basal que no son leñosos, y alcanzan los 7 m de altura.

2.8.1. Banano en Guatemala

En Guatemala el banano ayuda de manera especial a la economía del país, convirtiéndose en una fuente importante de ingresos de exportación y de empleo, después del café y el azúcar. Es por eso que Guatemala, durante muchos años, ha sido uno de los países exportadores de banano con mas estabilidad lo que ha permitido que la productividad de las tierras aumente gradualmente.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

En la metodología de la biosorción de la cáscara de banano se utilizarán variables físicas y químicas.

3.1.1. Variables físicas

A continuación se presentan las variables físicas:

- Tamaño de partícula
- Temperatura de operación
- Tiempo de contacto
- Masa de partículas utilizadas
- Concentración inicial de Cu^{+2}
- Concentración final de Cu^{+2}
- Absorbancia

3.1.2. Variables químicas

La única variable química a considerar es:

- pH

3.1.3. Evaluación de un método espectrofotométrico para la determinación de la concentración de cobre

Mediante el espectrofotómetro de luz visible se midió la absorbancia de distintas muestras, de concentración conocida de un complejo. Esto formado por sulfato de cobre pentahidratado y amoníaco al 25 %, para realizar una curva de calibración.

Tabla I. Definición operacional de las variables para la elaboración de la curva de calibración

Núm.	Variable	Unidad	Factor Potencial de diseño		Tipo de variable	
			Constante	No constante	Independiente	Dependiente
1	Masa de sulfato de cobre pentahidratado	g	X		X	
2	Volumen de amoníaco	mL	X		X	
3	Concentración del complejo	mol/L		X	X	
4	Absorbancia	Λ		X		X

Fuente: elaboración propia.

3.1.4. Eliminación de Cu^{+2} mediante biosorción de la cáscara de banano

A continuación se presentan las variables operacionales que se consideraron para evaluar la capacidad biosortiva de la cáscara de banano en la eliminación de cobre divalente (Cu^{+2}). La parte experimental para llegar a estos resultados es análoga a al anterior, únicamente depende del tratamiento que se les de a los datos para estimar cada resultado.

Tabla II. **Definición operacional de las variables de la biosorción de la cáscara de banano en la eliminación del cobre divalente**

Núm.	Variable	Unidad	Factor Potencial de diseño		Tipo de variable	
			Constante	No constante	Independiente	Dependiente
1	Volumen de la solución	mL	X		X	
2	Tamaño de partícula	mm		X		X
3	Temperatura de operación	°C		X		X
4	Tiempo de contacto	min		X		X
5	Concentración inicial del cobre	g/L	X		X	
6	Concentración final del cobre	g/L		X		X
7	pH de disolución	-		X		X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

Identifica los límites o alcances específicos del estudio.

3.2.1. Fundamentos

Los fundamentos considerados son:

- Fundamentos teóricos necesarios: fisicoquímica, química analítica, análisis instrumental, química orgánica.
- Aplicación de procedimiento experimental: espectrofotometría, volumetría.

3.2.2. Lugar de realización

El secado artificial, la trituración y tamizado de la cáscara de banano se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE).

Por otra parte, la realización de las pruebas correspondientes con la cáscara de banano ya lista para el tratamiento, se llevó a cabo en el Laboratorio de Análisis Físicoquímicos (LAFIQ) del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CCI), y el laboratorio del área de Físicoquímica. Además, se realizó el análisis espectrofotométrico de las muestras.

3.2.3. Viabilidad de la investigación

La investigación es viable ya que se puede considerar como una variación de la tesis *Biossorção de Urânio nas Cascas de banana* de la investigadora brasileña Milena Boniolo, aplicando el procedimiento propuesto, variando factores como la cantidad de biosorbente utilizado y llevando a cabo la eliminación de cobre divalente (Cu^{+2}) en vez de uranio. Se utiliza amoníaco para acomplejar el sulfato de cobre pentahidratado y así obtener mediciones de absorbancia mediante el espectrofotómetro UV-visible.

3.3. Recursos humanos disponibles

El método de biosorción propuesto y el posterior manejo de datos, obtenidos luego de la experimentación, estuvo a cargo del investigador Carlos Guillermo Mendoza Meza. Se realiza además, la interpretación posterior de los resultados; asistido de manera continua por el asesor, Ing. Qco. Víctor Manuel Monzón Valdez.

Por otro lado, aportando valiosa ayuda complementaria, la licenciada en química Ingrid Lorena Benítez Pacheco colaboró en la interpretación de datos y brindó asesoría en el manejo correcto de equipos utilizados para la realización de la parte experimental del método.

3.4. Recursos materiales disponibles

Partiendo de la metodología experimental propuesta, se requiere de los siguientes equipos, cristalería y reactivos:

3.4.1. Equipos auxiliares

El equipo auxiliar a utilizar es:

- Espectrofotómetro de luz UV – visible
- Horno transversal de bandejas
- Horno de secado al vacío
- Campana de extracción
- Plancha de calentamiento con agitador magnético
- Tamizador

3.4.2. Instrumentos de medición

Los instrumentos de medición son:

- Balanza analítica, marca RADWAG, modelo WPS 750C/1 Alcance: 0,001 g
- Potenciómetro, marca HANNA. Alcance: 0 – 14 pH
- Termómetro de mercurio

- Cronómetro

3.4.3. Cristalería

La cristalería empleada es:

- Tubos de ensayo de 10 mL
- Balón aforado de 25 mL
- Balón aforado de 100 mL
- Pipeta volumétrica de 10 mL
- Pipeta volumétrica de 5 mL
- Pipeta volumétrica de 2 mL
- Pipeta volumétrica 1 mL
- *Beaker* de 50 mL
- *Beaker* de 100 mL
- *Beaker* de 400 mL
- Probeta 200 mL
- Embudo
- Varillas de agitación

3.4.4. Reactivos

Los reactivos utilizados son:

- Hidróxido de sodio grado reactivo
- Ácido clorhídrico 37 %
- Sulfato de cobre pentahidratado grado reactivo
- Hidróxido de amonio 25 %

3.4.5. Materiales

El material empleado es:

- Papel filtro 1292 (grosor de 0,17 mm, retención de partículas de 5-8 μm).

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Se trabajó utilizando una técnica cuantitativa, debido a que dentro de los objetivos planteados, se desea evaluar el rendimiento de la biosorción y las variables adecuadas de operación.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Recolectar datos con los que se quiere validar la hipótesis del trabajo, significa someter a medición los a variables que en determinada investigación, en su totalidad o en alguna de sus dimensiones se consideren relevantes.

3.6.1. Metodología experimental, basada en el método de colorimetría⁵, para la determinación de un modelo matemático que relacione la concentración de cobre divalente (Cu+2) en solución con la absorbancia medida mediante espectrofotometría visible

La metodología se enumera a continuación:

⁵ Universidad autónoma de Madrid. *Práctica 4 Colorimetría. Ley de Lambert - Beer*

- Preparar 100 mL de una solución patrón 0,100 M de sulfato de cobre pentahidratado.
- Preparar un blanco con 5 mL de amoníaco al 25 %, aforando a 25 mL con agua destilada.
- Preparar 8 soluciones con 5 mL de amoníaco al 25 %, utilizando 1, 2,5, 3,5, 5, 6, 7,5, 8,5 y 10 mL de la solución patrón preparada y aforar cada solución a 25 mL con agua destilada.
- Elegir la longitud de onda a utilizar en el espectrofotómetro.
- Medir la absorbancia de cada solución.
- Presentar la recta de calibrado.
- Obtener el modelo matemático que describa la curva con su respectivo coeficiente de correlación (R^2).

3.6.2. Metodología experimental para la evaluación de la capacidad biosortiva de la cáscara de banano al variar los gramos de biosorbente

La metodología se realiza de la siguiente forma:

- Preparar 100 mL de solución 0,1000 M de sulfato de cobre pentahidratado en un balón aforado.
- Tomar una alícuota de 7,5 mL de la solución preparada en el paso anterior y aforar hasta 25 mL con agua destilada.
- Mezclar 0,05, 0,1, 0,15, 0,20, 0,25, 0,3 y 0,4 gramos de cáscara de banano triturada y tamizada con número de mesh 30, 12 y 10 (escala Tyler) y en 7 distintos recipientes a 25 °C.
- Mantener el pH = 11
- Agitar con 400 rpm durante 3 minutos y luego dejar estabilizar cada una de las soluciones.

- Filtrar las soluciones con papel filtro.
- Agregar 5 mL de amoníaco al 25 %.
- Medir la absorbancia de las muestra en el espectrofotómetro.
- Realizar el mismo procedimiento dos veces más, a las mismas condiciones de temperatura, tiempo de contacto y pH, definidas en la sección 3,7: Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.
- Limpiar el equipo y desechar las soluciones.

3.6.3. Metodología experimental para la evaluación de la capacidad biosortiva de la cáscara de banano al variar el tiempo de contacto

La metodología se realiza de la siguiente forma:

- Preparar 100 mL de solución 0,1000 M de sulfato de cobre pentahidratado en un balón aforado.
- Tomar una alícuota de 7,5 de la solución preparada en el paso anterior y aforar hasta 25 mL con agua destilada.
- Mezclar 0,2 gramos de cáscara de banano triturada de 0.6 mm, en 7 distintos recipientes a 25 °C.
- Mantener el pH = 11.
- Agitar con 400 rpm durante 3, 10, 25, 30 35, 45, 60 minutos y luego dejar estabilizar cada una de las soluciones.
- Filtrar las soluciones con papel filtro.
- Agregar 5 mL de amoníaco al 25 %.
- Medir la absorbancia de las muestras en el espectrofotómetro.
- Realizar el mismo procedimiento dos veces más, a las mismas condiciones de temperatura, tamaño de partícula (mesh), tiempo de

contacto y pH, definidas en la sección 3,7: Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.

- Limpiar el equipo y desechar las soluciones.

3.6.4. Metodología experimental para la evaluación de la capacidad biosortiva de la cáscara de banano al variar la temperatura de trabajo

A continuación se presentan los pasos en los que se trabaja la metodología:

- Preparar 100 mL de solución 0,1000 M de sulfato de cobre pentahidratado en un balón aforado.
- Tomar una alícuota de 7,5 de la solución preparada en el paso anterior y aforar hasta 25 mL con agua destilada.
- Mezclar 0,2 gramos de cáscara de banano triturada de 0,6 mm, en 7 distintos recipientes a 10,15, 20, 25, 30, 40 y 45 °C.
- Mantener el pH = 11.
- Agitar con 400 rpm durante 3 minutos y luego dejar estabilizar cada una de las soluciones.
- Filtrar las soluciones con papel filtro.
- Agregar 5 mL de amoníaco al 25 %.
- Medir la absorbancia de las muestras en el espectrofotómetro.
- Realizar el mismo procedimiento dos veces más, a las mismas condiciones de temperatura, tamaño de partícula (mesh), tiempo de contacto y pH, definidas en la sección 3.7: Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.
- Limpiar el equipo y desechar las soluciones.

3.6.5. Metodología experimental para la evaluación de la capacidad biosortiva de la cáscara de banano al variar el pH de la solución

A continuación se listan los pasos de la metodología:

- Preparar 100 mL de solución 0,1000 M de sulfato de cobre pentahidratado en un balón aforado.
- Tomar una alícuota de 7,5 de la solución preparada en el paso anterior y aforar hasta 25 mL con agua destilada.
- Mezclar 0.2 gramos de cáscara de banano triturada de 0,6 mm, en 4 distintos recipientes a 25 °C.
- Ajustar a pH = 8,8,5, 9, 10 con HCl al 37 %⁶.
- Agitar con 400 rpm durante 3 minutos y luego dejar estabilizar cada una de las soluciones.
- Filtrar las soluciones con papel filtro
- Agregar 5 mL de amoníaco al 25 %.
- Medir la absorbancia de las muestras en el espectrofotómetro.
- Realizar el mismo procedimiento dos veces más, a las mismas condiciones de temperatura, tamaño de partícula (mesh), tiempo de contacto y pH, definidas en la sección 3,7: Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.
- Limpiar el equipo y desechar las soluciones.

⁶ El pH se debe mantener en un rango básico para que no se pierda el complejo por neutralización ácido - base.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Esta etapa consiste en el ordenamiento de la información que se ha recogido; revisión de los instrumentos ya aplicados, clasificación según lugares, periodos, entre otros.

Tabla III. **Definición de factores constantes y medición de absorbancia con distintas variables para cada tratamiento**

Factores constantes	Tiempo (min)	Cantidad de biosorbente (g)			Temperatura (°C)	pH	Tamaño de partícula (mm)
Valores	3	0,2			25	11	0,6
MEDICIÓN DE ABSORBANCIA DE SOLUCIÓN 0.1 M DE SULFATO DE COBRE PENTAHIDRATADO							
Variable	Cantidad de biosorbente						
Valores propuestos (g)	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4
Absorbancia medida							
Variable	Tiempo						
Valores propuestos (min)	3	10	25	30	35	45	60
Absorbancia medida							
Variable	Temperatura						
Valores propuestos (°C)	10	15	20	25	30	40	45
Absorbancia medida							
Variable	pH						
Valores propuestos (pH)	11	10	9	8	-	-	-
Absorbancia medida							

Fuente: elaboración propia.

3.7.1. Metodología de cálculo de porcentaje de reducción de cobre divalente en solución luego de aplicar el método

- Medir la absorbancia de cada una de las soluciones de los distintos tratamientos utilizando el espectrofotómetro de absorción visible.
- Utilizar el modelo matemático obtenido en la sección 3.6.1 para determinar la concentración final del cobre divalente en solución.
- Determinar el porcentaje de remoción de cobre divalente de la solución restando la concentración de cobre inicial y la concentración de cobre final, dividido la concentración de cobre inicial. [Ec. 1].
- Relacionar gráficamente el porcentaje de remoción de cada una de las soluciones contra tiempo de contacto, temperatura, pH y diámetro de partícula respectivamente.
- Interpretar las gráficas obtenidas.

3.7.2. Elaboración de las isotermas de adsorción de Freundlich y Langmuir

- Preparar 10 mL de soluciones 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,07, 0,08 y 0,1 M de sulfato de cobre pentahidratado
- Ajustar el pH = 8 agregando HCl al 37 % a cada solución
- Pesar 50 mg de biosorbente de 0,6 mm y agregarlos a cada solución
- Agitar cada solución a 400 rpm durante 50 min a 25 °C
- Filtrar las muestras utilizando papel filtro
- Agregar 5 mL de amoníaco a cada solución

- Medir la absorbancia de las muestras

3.8. Análisis estadístico

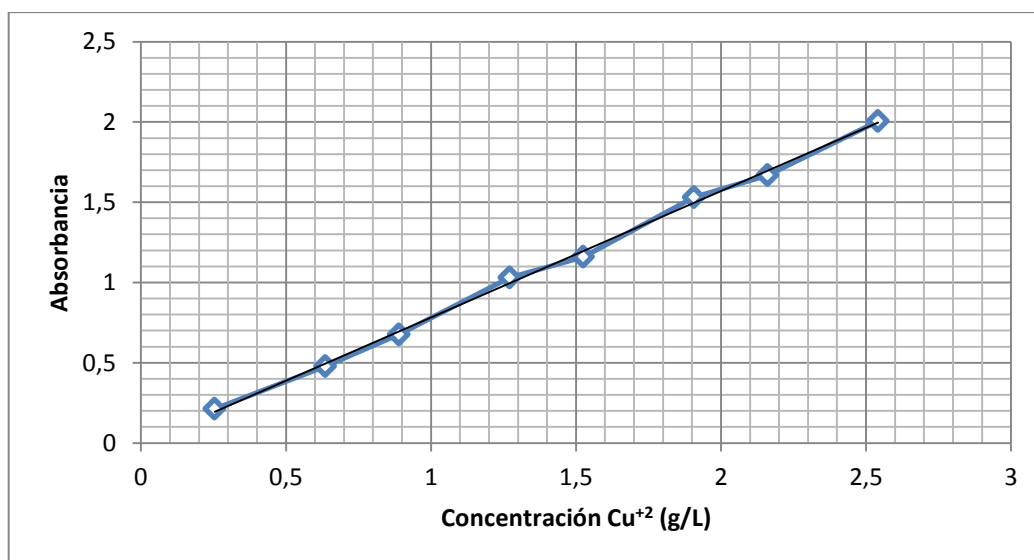
No existen valores teóricos de una investigación similar. El análisis estadístico se realizará para determinar la validez y confiabilidad de los resultados, repitiendo el procedimiento en tres tratamientos propuestos. Se utilizarán herramientas de análisis estadístico básico, y se llevará a cabo el análisis de varianzas con el método Anova.

4. RESULTADOS

4.1. Curva de calibración

Ordenadas frente a concentración donde los puntos rojos proceden de la lectura del material estándar y el cuadrado azul es leído por interpolación de los datos previos.

Figura 3. **Curva de calibración del método espectrofotométrico utilizando una longitud de onda de 602 nm**



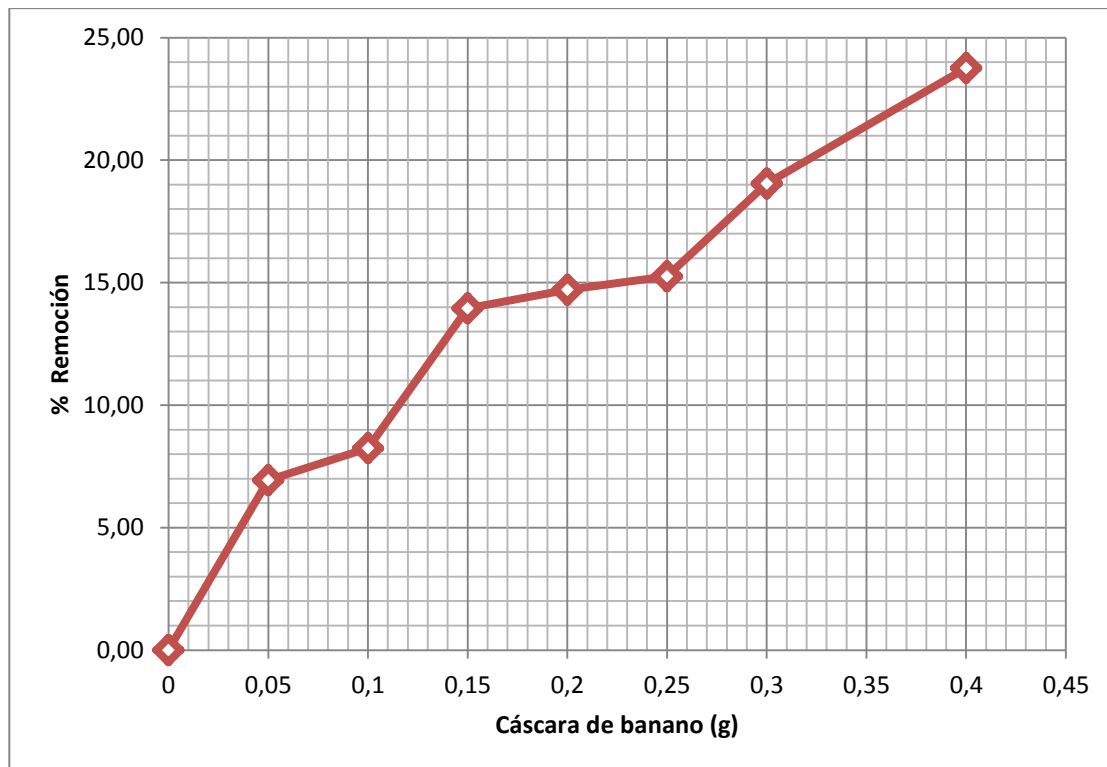
Color	Modelo matemático	R ²	Rango
	$C = (A+0,0053)/0,7873$	0,998	0 - 3 g/L

Fuente: elaboración propia.

4.2. Cantidad de cáscara de banano de 0,6 mm

A continuación se describe un porcentaje en cuanto a la cantidad de cáscara de banano utilizado.

Figura 4. **Porcentaje de remoción de cobre divalente en función de la cantidad de cáscara de banano adicionada de 0,6 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 3 minutos y un pH = 11**



Color	Modelo matemático	R ²	Rango
	$\%R = 54,269x + 2,9027$	0,944	0 - 0,5 g

Fuente: elaboración propia.

4.2.1. Análisis estadístico de la cantidad de cáscara de banano 0,6 mm

A continuación se presenta un análisis de la información recolectada.

Tabla IV. Análisis de varianza de la cantidad de cáscara de banano de 0,6 mm

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	372,8657274	6	62,14428789	29,27625701	0,00012835	3,865968853
Dentro de los grupos	14,85879889	7	2,122685556			
Total	387,245263	13				

Fuente: elaboración propia.

- Criterios de comparación de la probabilidad y α
 - Si $P < \alpha$ rechazo H_0
 - Si $P > \alpha$ acepto H_0

- Criterios de comparación del valor de F de Fischer y la F crítica
 - Si $F > F_{Crítica}$ rechazo H_0
 - Si $F < F_{Crítica}$ acepto H_0

$$H_0 = \mu_{0,05} = \mu_{0,1} = \mu_{0,15} = \mu_{0,20} = \mu_{0,25} = \mu_{0,30} = \mu_{0,40}$$

$$\text{Valor de } P \ 0,00023835 < \text{alfa } 0,05$$

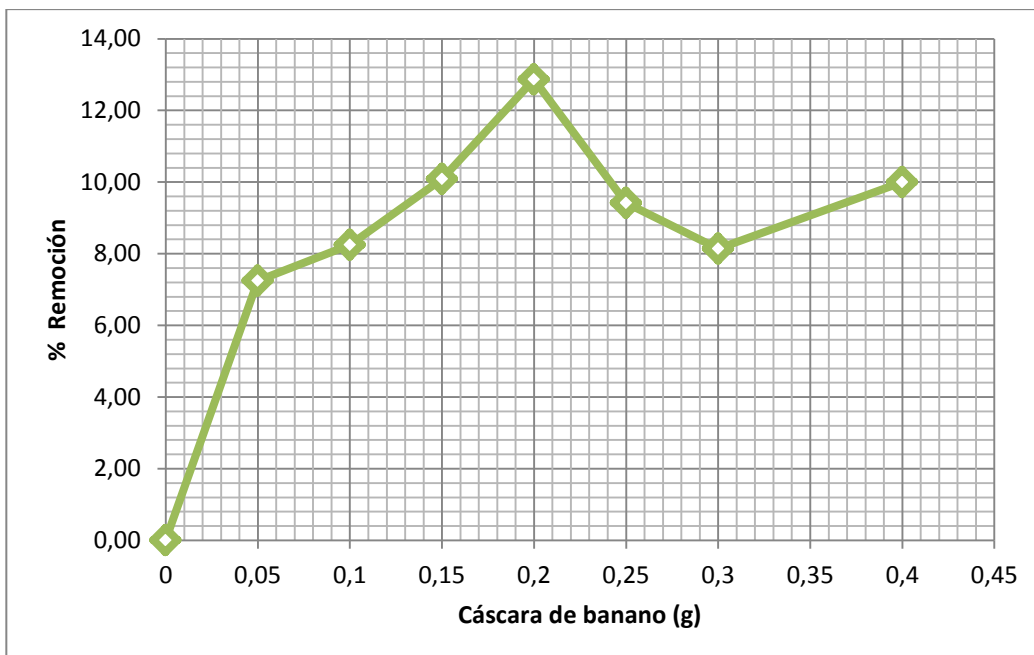
$$\text{Valor de } F \ 29,27625701 > F_{Crítica} \ 3,865968853$$

Según el porcentaje de probabilidad entre los resultados obtenidos (<95,95 %), existen diferencias significativas entre los valores medios del porcentaje de remoción de cobre divalente y las distintas cantidades de cáscara de banano de 0,6 mm con las que se ha llevado a cabo el análisis.

4.3. Cantidad de cáscara de banano de 1,68 mm

A continuación se presenta un porcentaje de remoción de cobre divalente en función de la cantidad de cáscara de banano adicionada de 1,68 mm.

Figura 5. **Porcentaje de remoción de cobre divalente en función de la cantidad de cáscara de banano adicionada de 1,68 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 3 minutos y un pH = 11**



Continuación de la figura 5.

Color	Modelo matemático	R ²	Rango
	$\%R = 926,55x^3 - 698,16x^2 + 155,2x + 0,1406$	0,9088	0 – 0,5 g

Fuente: elaboración propia.

4.3.1. Análisis estadístico de la cantidad de cáscara de banano 1,68 mm

A continuación se presenta un análisis de varianza de la cantidad de cáscara de banano de 1,68 mm.

Tabla V. Análisis de varianza de la cantidad de cáscara de banano de 1,68 mm

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	47,06527122	6	7,84421187	10,06980057	0,003773035	3,865968853
Dentro de los grupos	5,452886848	7	0,778983835			
Total	52,51815807	13				

Fuente: elaboración propia.

- Criterios de comparación de la probabilidad y α
 - Si $P < \alpha$ rechazo H_0
 - Si $P > \alpha$ acepto H_0

- Criterios de comparación del valor de F de Fischer y la F crítica
 - Si $F > F_{Crítica}$ rechazo H_0
 - Si $F < F_{Crítica}$ acepto H_0

$$H_0 = \mu_{0,05} = \mu_{0,1} = \mu_{0,15} = \mu_{0,20} = \mu_{0,25} = \mu_{0,30} = \mu_{0,40}$$

Valor de P 0,003773035 < alfa 0,05

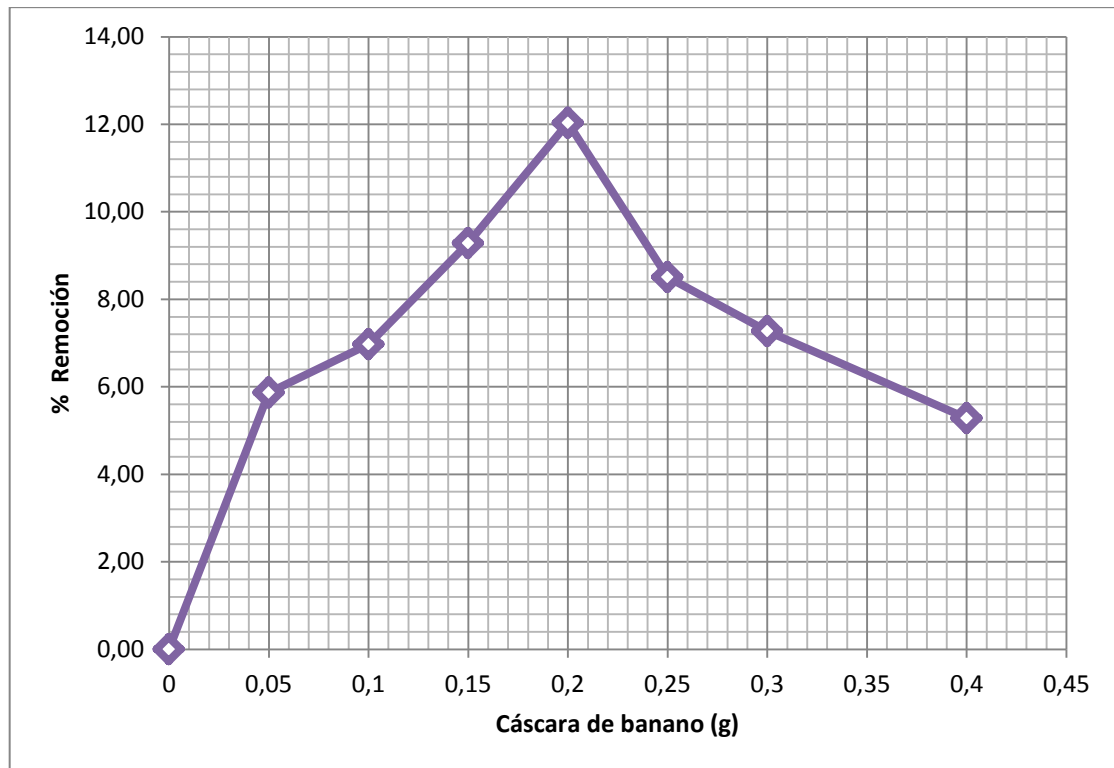
Valor de F 10,06980057 > $F_{Crítica}$ 3,865968853

Según el porcentaje de probabilidad entre los resultados obtenidos (<95,95 %), existen diferencias significativas entre los valores medios del porcentaje de remoción de cobre divalente y las distintas cantidades de cáscara de banano de 1,68 mm con las que se ha llevado a cabo el análisis.

4.4. Cantidad de cáscara de banano de 2 mm

A continuación se presenta de forma gráfica el porcentaje de remoción de cobre divalente en función de la cantidad de cáscara de banano adicionada de 2 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 3 minutos y un pH = 11.

Figura 6. **Porcentaje de remoción de cobre divalente en función de la cantidad de cáscara de banano adicionada de 2 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 3 minutos y un pH = 11**



Color	Modelo matemático	R ²	Rango
	$\%R = 475,41x^3 - 463,65x^2 + 121,26x + 0,014$	0,9125	0 – 0,5 g

Fuente: elaboración propia.

4.4.1. Análisis estadístico de la cantidad de cáscara de banano 2 mm

A continuación se hace una descripción del análisis de varianza de la cantidad de cáscara de banano de 2 mm.

Tabla VI. Análisis de varianza de la cantidad de cáscara de banano de 2 mm

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	61,23616882	6	10,20602814	17,94582672	0,00063104	3,865968853
Dentro de los grupos	3,980992244	7	0,568713178			
Total	65,21716107	13				

Fuente: elaboración propia.

- Criterios de comparación de la probabilidad y α
 - Si $P < \alpha$ rechazo H_0
 - Si $P > \alpha$ acepto H_0

- Criterios de comparación del valor de F de Fischer y la F crítica
 - Si $F > F_{Crítica}$ rechazo H_0
 - Si $F < F_{Crítica}$ acepto H_0

$$H_0 = \mu_{0,05} = \mu_{0,1} = \mu_{0,15} = \mu_{0,20} = \mu_{0,25} = \mu_{0,30} = \mu_{0,40}$$

Valor de P 0,00063104 < alfa 0,05

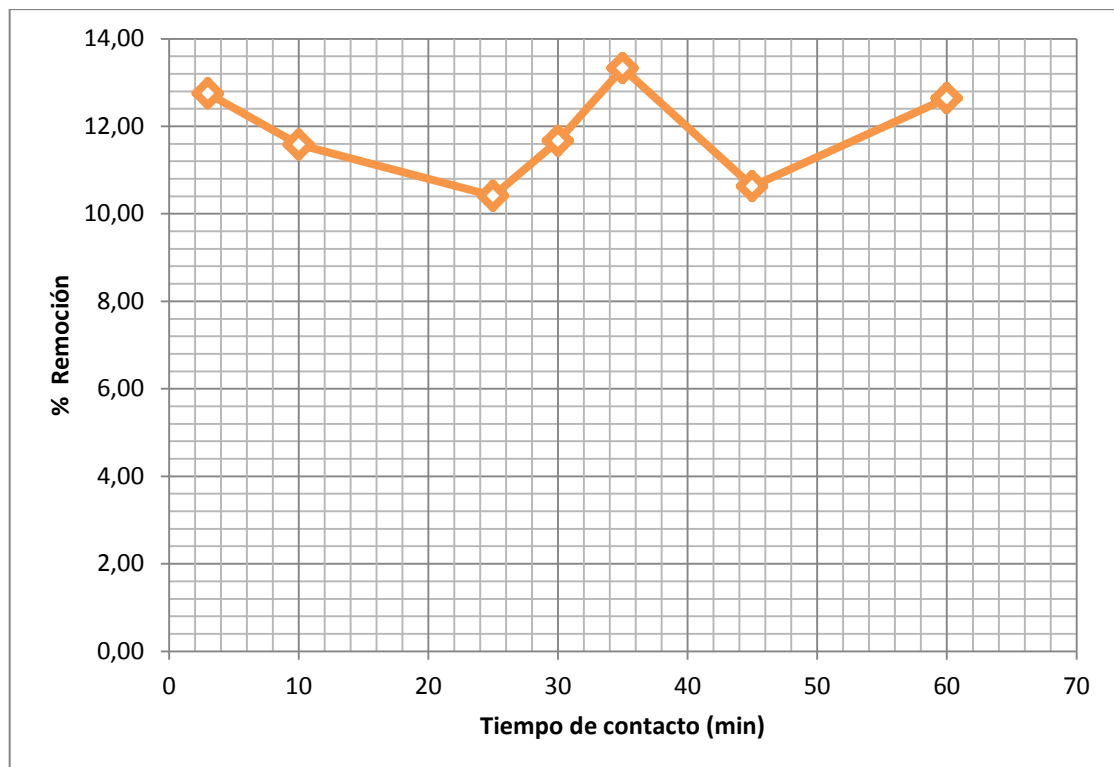
Valor de F 17,94582672 > $F_{Crítica}$ 3,865968853

Según el porcentaje de probabilidad entre los resultados obtenidos (<95,95 %), existen diferencias significativas entre los valores medios del porcentaje de remoción de cobre divalente y las distintas cantidades de cáscara de banano de 2 mm con las que se ha llevado a cabo el análisis.

4.5. Tiempo de contacto

A continuación se presenta porcentaje de remoción de cobre divalente en función del tiempo de contacto, adicionando 0,2 g de cáscara de banano.

Figura 7. **Porcentaje de remoción de cobre divalente en función del tiempo de contacto, adicionando 0,2 g de cáscara de banano de 0,6 mm a 25 °C y un pH = 11**



Continuación de la figura 7.

Color	Modelo matemático	R ²	Rango
	$\%R = 1E-06t^5 - 2E-04t^4 + 7,9E-03t^3 - 0,1464t^2 + 0,8039t + 11,296$	0,9869	3 – 60 min

Fuente: elaboración propia.

4.5.1. Análisis estadístico del tiempo de contacto

A continuación se presenta un análisis de varianza del tiempo de contacto.

Tabla VII. Análisis de varianza del tiempo de contacto

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	15,50608973	6	2,584348289	0,890548812	0,548149931	3,865968853
Dentro de los grupos	20,31380849	7	2,901972641			
Total	35,81989822	13				

Fuente: elaboración propia.

- Criterios de comparación de la probabilidad y α
 - Si $P < \alpha$ rechazo H_0
 - Si $P > \alpha$ acepto H_0

- Criterios de comparación del valor de F de Fischer y la F crítica
 - Si $F > F_{Crítica}$ rechazo H_0
 - Si $F < F_{Crítica}$ acepto H_0

$$H_0 = \mu_3 = \mu_{10} = \mu_{25} = \mu_{30} = \mu_{35} = \mu_{45} = \mu_{60}$$

Valor de P 0,548149931 > alfa 0,05

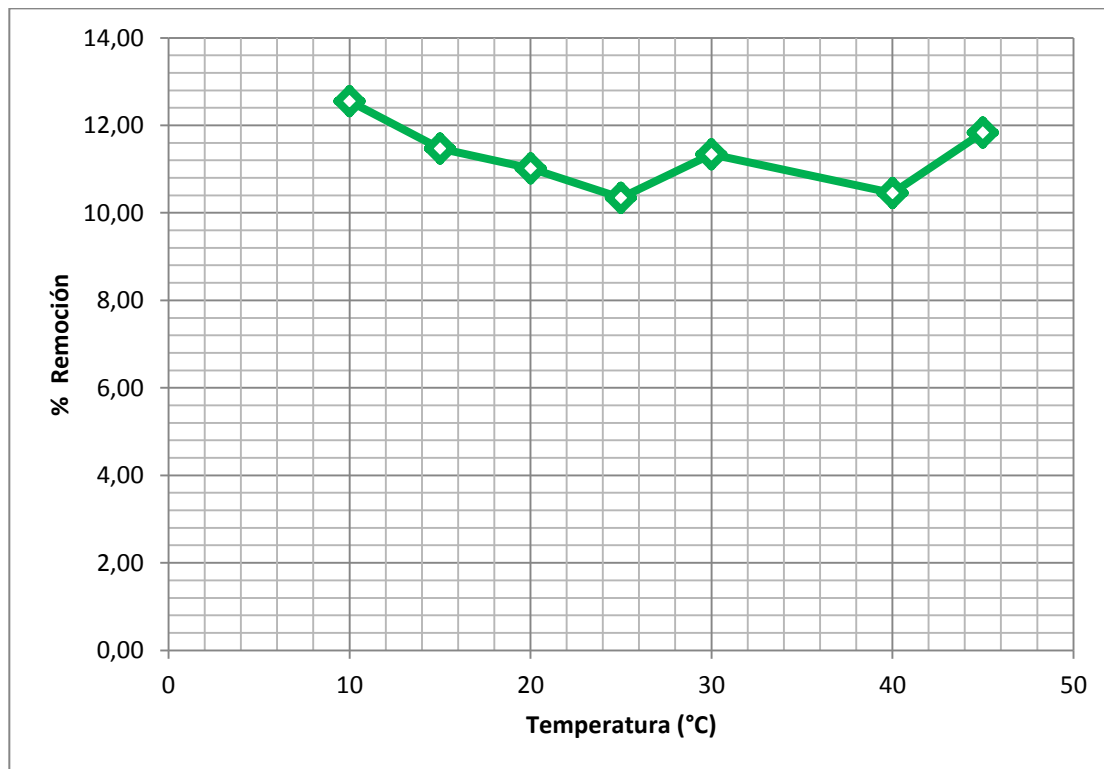
Valor de F 0,890548812 < F_{Crítica} 3,865968853

Según el porcentaje de probabilidad entre los resultados obtenidos (<95,95 %), no existen diferencias significativas entre los valores medios del porcentaje de remoción de cobre divalente y los distintos tiempos de contacto a los que se ha llevado a cabo el análisis.

4.6. Temperatura

A continuación se presenta un porcentaje de remoción de cobre divalente en función de la temperatura de operación, adicionando 0,2 g de cáscara de banano de 0,6 mm con un tiempo de contacto de 3 minutos y un pH = 11.

Figura 8. **Porcentaje de remoción de cobre divalente en función de la temperatura de operación, adicionando 0,2 g de cáscara de banana de 0,6 mm con un tiempo de contacto de 3 minutos y un pH = 11**



Color	Modelo matemático	R ²	Rango
	$\%R = -4E-06T^5 + 6E-04T^4 - 0,0279T^3 + 0,6519T^2 - 7,2492T + 42,335$	0,9491	10 – 45 °C

Fuente: elaboración propia.

4.6.1. Análisis estadístico de la temperatura

A continuación se presenta un análisis estadístico de la temperatura de la cáscara de banano.

Tabla VIII. Análisis de varianza de la temperatura

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	8,644801579	6	1,440800263	0,27337294	0,932488482	3,865968853
Dentro de los grupos	36,89319757	7	5,270456796			
Total	45,53799915	13				

Fuente: elaboración propia.

- Criterios de comparación de la probabilidad y α
 - Si $P < \alpha$ rechazo H_0
 - Si $P > \alpha$ acepto H_0
- Criterios de comparación del valor de F de Fischer y la F crítica
 - Si $F > F_{Crítica}$ rechazo H_0
 - Si $F < F_{Crítica}$ acepto H_0

$$H_0 = \mu_{10} = \mu_{15} = \mu_{20} = \mu_{25} = \mu_{30} = \mu_{40} = \mu_{45}$$

Valor de P 0,932488482 > alfa 0,05

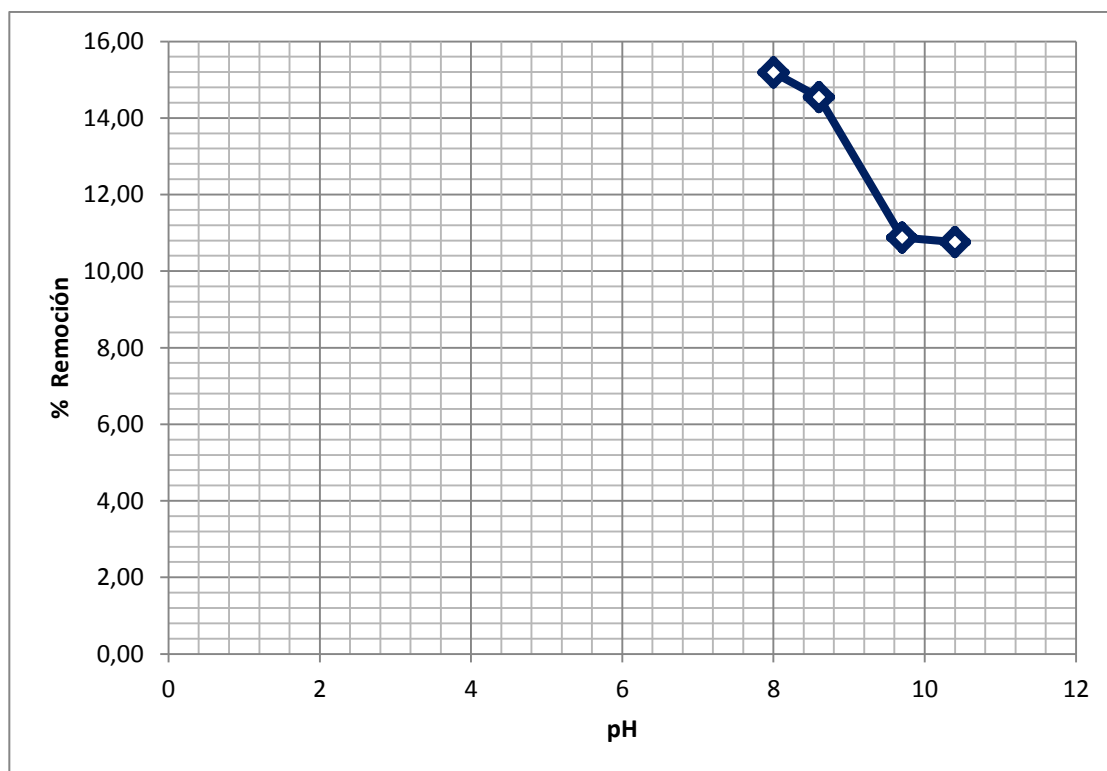
Valor de F 0,27337294 < $F_{Crítica}$ 3,865968853

Según el porcentaje de probabilidad entre los resultados obtenidos (<95,95 %), no existen diferencias significativas entre los valores medios del porcentaje de remoción de cobre divalente y las distintas temperaturas a las que se ha llevado a cabo el análisis.

4.7. pH

A continuación se presenta un porcentaje del ph de la cáscara de banano.

Figura 9. **Porcentaje de remoción de cobre divalente en función del pH, adicionando 0,2 g de cáscara de banano de 0,6 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 3 minutos**



Continuación de la figura 9.

Color	Modelo matemático	R ²	Rango de pH
	$\%R = -2.3024\text{pH}^4 + 85.788\text{pH}^3 - 1194\text{pH}^2 + 7354.5\text{pH} - 16897$	1	8 – 11

Fuente: elaboración propia.

4.7.1. Análisis estadístico del pH

A continuación se presenta el análisis estadístico de varianza del pH de la cáscara de banano.

Tabla IX. Análisis de varianza de del pH

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	33,63051205	3	11,21017068	19,64646353	0,007410749	6,591382116
Dentro de los grupos	2,282379354	4	0,570594839			
Total	35,91289141	7				

Fuente: elaboración propia.

- Criterios de comparación de la probabilidad y α
 - Si $P < \alpha$ rechazo H_0
 - Si $P > \alpha$ acepto H_0

- Criterios de comparación del valor de F de Fischer y la F crítica
 - Si $F > F_{\text{Crítica}}$ rechazo H_0

- Si $F < F_{\text{Crítica}}$ acepto H_0

$$H_0 = \mu_{10} = \mu_{15} = \mu_{20} = \mu_{25} = \mu_{30} = \mu_{40} = \mu_{45}$$

Valor de P 0,007410749 < alfa 0,05

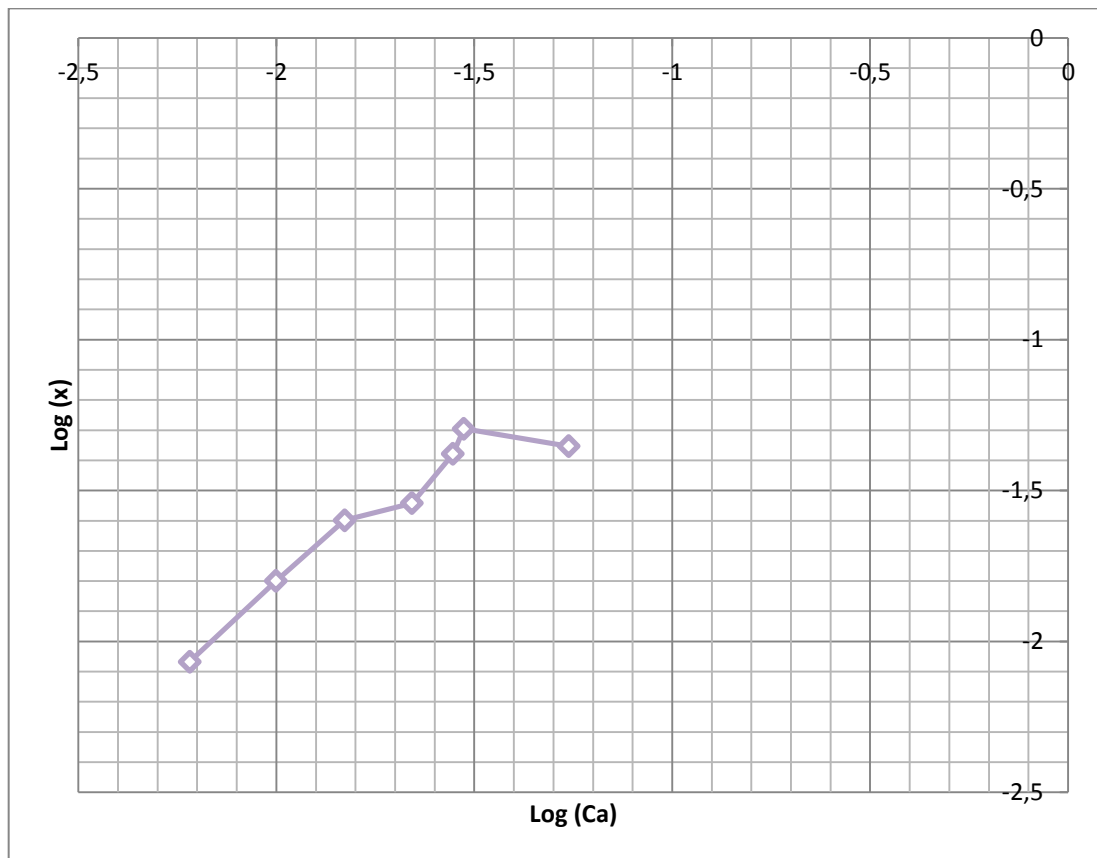
Valor de F 19,64646353 > $F_{\text{Crítica}}$ 3,865968853

Según el porcentaje de probabilidad entre los resultados obtenidos (<95,95 %), existen diferencias significativas entre los valores medios del porcentaje de remoción de cobre divalente y los distintos pH a los que se ha llevado a cabo el análisis.

4.8. Isoterma de Freundlich

A continuación se presenta de forma gráfica la Isoterma de Freundlich linealizada para el equilibrio de adsorción, cobre divalente – cáscara de banano, utilizando 50 mg de cáscara de banano.

Figura 10. **Isoterma de Freundlich linealizada para el equilibrio de adsorción, cobre divalente–cáscara de banano, utilizando 50 mg de cáscara de banano de 0.6 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 50 minutos a pH = 11**



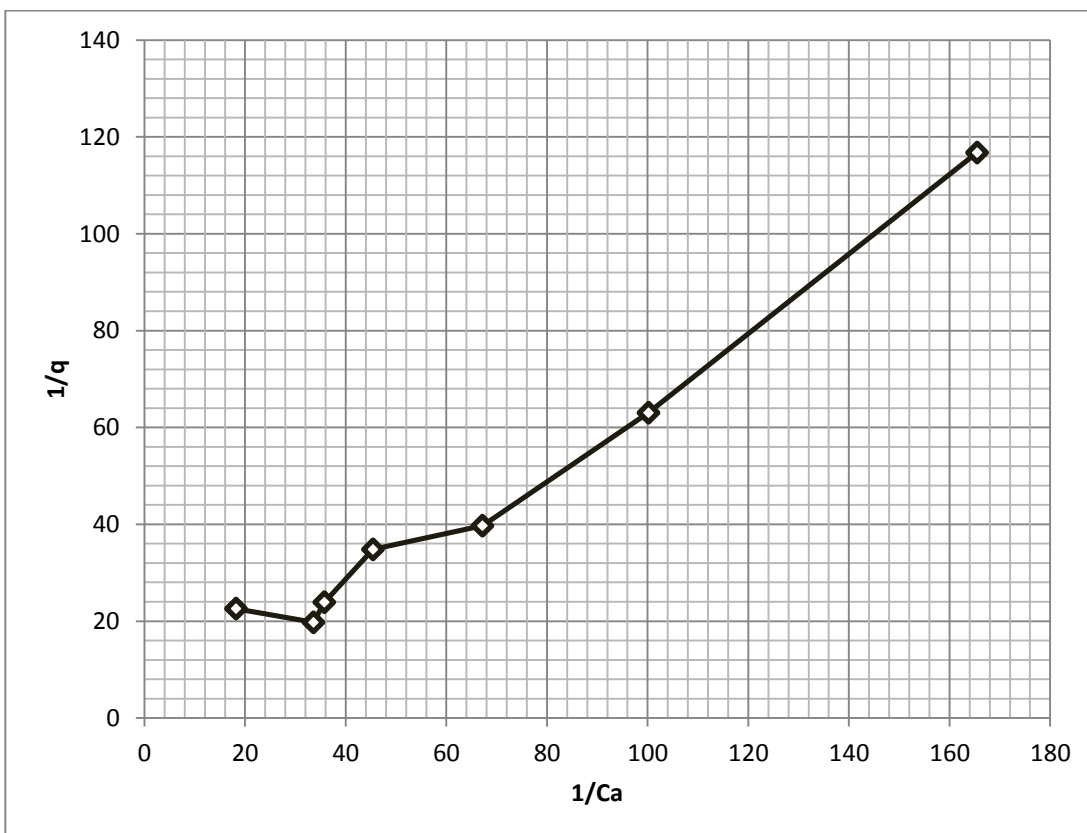
Color	Modelo matemático	R ²	Rango
	$\log (x) = 0,8107 \log (Ca) - 0,1814$	0,8839	-2,21 a - 1,26

Fuente: elaboración propia.

4.9. Isoterma de Langmuir

A continuación se presenta de forma gráfica la Isoterma de Langmuir linealizada para el equilibrio de adsorción, cobre divalente cáscara de banano, utilizando 50 mg de cáscara de banano.

Figura 11. **Isoterma de Langmuir linealizada para el equilibrio de adsorción, cobre divalente-cáscara de banano, utilizando 50 mg de cáscara de banano de 0,6 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 50 minutos a pH = 11**



Continuación de la figura 11.

Color	Modelo matemático	R ²	Rango
	$1/q = 0,6663 (1/Ca) + 1,4387$	0,9717	18,24 a – 165,48

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo de investigación consistió en la evaluación de la capacidad biosortiva de la cáscara de banano en la eliminación de cobre divalente (Cu^{+2}) de una solución de sulfato de cobre pentahidratado. Esto a escala laboratorio, mediante espectrofotometría visible.

Las cáscaras de banano utilizadas en la experimentación fueron donadas por un comerciante independiente del mercado municipal de la Antigua Guatemala.

La presente investigación tiene como objetivo indirecto la utilización de materia orgánica de desecho, lo que constituye una nueva alternativa para su deposición, que a su vez reduce el impacto ambiental.

El método de preparación de la cáscara de banano para utilizarla como materia prima en la parte experimental, consistió en su deshidratación en un horno de secado transversal de bandejas. Dadas las características orgánicas del material, inicialmente se realizaron pruebas preliminares para determinar el tiempo adecuado de secado en un horno de vacío en el LIEXVE y se controló la temperatura para evitar una posible descomposición de la muestra.

De esta manera se determinó que dicho tiempo de secado fue de aproximadamente 6 horas a 80 °C para la cantidad de materia prima que se buscaba deshidratar. Se corroboró que, el porcentaje de humedad teórico que contenía la cáscara, era de aproximadamente 87 %. Ver Anexo 10.

Posterior al secado de la materia prima se procedió a realizar la trituración de la misma mediante un mortero. Luego se realizó el tamizaje correspondiente para homogenizar el tamaño de partícula. Cabe mencionar que se utilizaron tres tamices con número de mesh 10, 12 y 30 respectivamente. Esto dio como resultado 20 gramos de cáscara de banano triturada y tamizada con el tamiz núm. 30 (0,6 mm), 28 gramos de cáscara de banano triturada y tamizada con el tamiz núm. 12 (1,68 mm) y 25 gramos de cáscara de banano triturada y tamizada con el tamiz núm. 10 (2 mm).

Para la elaboración de la curva de calibración del método espectrofotométrico propuesto, se preparó una solución de sulfato de cobre pentahidratado 0,1 M. De esta se tomaron 10 mL y se acomplejó con 5 mL de hidróxido de amonio al 25 %, formando así el complejo sulfato de tetraamín cobre, como se puede observar en el apéndice 1.

Posteriormente, se llevó a cabo el barrido de la muestra para identificar la longitud de onda a la cual se debía trabajar, dando como resultado 602 nm. Este valor se encuentra entre el rango UV–visible, correspondiendo a que, como es sabido, para que una sustancia sea coloreada debe absorber luz visible, provocando así una transición de electrones.

En el caso del complejo amoniacal formado de color azul, “La presencia de los ligandos de amoniaco alrededor del ion Cu^{+2} provoca que los orbitales 3d del ion metálico se diferencien energéticamente, posibilitando la absorción de un fotón de energía adecuadas.”⁷ Por lo tanto se determinó que al realizar las mediciones requeridas, la absorción obtenida le correspondió al ion metálico en cuestión.

⁷ Universidad autónoma de Madrid. *Práctica 4 Colorimetría. Ley de Lambert – Beer.*

Se utilizó un blanco de 5 mL de hidróxido de amonio al 25 % aforado a 25 mL con agua destilada. Posteriormente se utilizaron 8 distintos volúmenes de sulfato de cobre pentahidratado 0,1 M y se acomplejaron con 5 mL de hidróxido de amonio al 25 %. Luego se afora a 25 mL con agua destilada, reaccionando completamente según los cálculos mostrados en el Apéndice 1.

Después de realizar las mediciones correspondientes, mediante el espectrofotómetro, se procedió a graficar los datos de absorbancia obtenidos en función de la concentración de cobre divalente (Cu^{+2}). Estos resultados se muestran dando como resultado en la Figura 1, en donde se puede observar una tendencia lineal con un coeficiente $R^2 = 0,998$. Este es un valor aceptable cercano a 1, lo cual demostró que el modelo obtenido era confiable y estaba listo para usarse en la medición de la concentración del ion metálico luego de los distintos tratamientos.

Se realizaron luego distintas pruebas preliminares con la cantidad de biosorbente a utilizar, dando como resultado que luego de adicionarle más de 0,5 gramos de cáscara de banano a la solución de sulfato de tetraamin cobre, esta presentaba un cambio de coloración desfavorable para el método espectrofotométrico propuesto, porque el color azul de la solución cambiaba y se tornaba verde oscuro. Cabe destacar que al ser un método colorimétrico, el cambio de coloración incide de manera significativa en la medición de absorbancia de las muestras, por ello, se estableció un rango de aplicación con base en la cantidad de biosorbente agregado, teniendo como máximo 0,4 gramos de cáscara de banano.

El cambio de coloración de la solución en cuestión pudo haber sido provocado por alguno de los compuestos orgánicos de los cuales está formada la cáscara de banano, descritos en el anexo 10. Esta puede tratarse de una

cera de color amarillo proveniente del extracto etéreo, que en contacto con la solución desprende su color. Se resalta que esta investigación está enfocada a la evaluación de la capacidad biosortiva de la cáscara de banano y no pretende determinar la razón del desprendimiento de color de la misma.

Luego de haber llevado cabo la experimentación descrita en la sección 3.6, se utilizó el modelo obtenido de la curva de calibración del método espectrofotométrico (figura 1) para conocer la concentración final de cada una de las soluciones. Posteriormente, se utilizó la relación de porcentaje de remoción en función de las distintas variables propuestas para visualizar el comportamiento mediante gráficas.

La figura 2 relaciona el porcentaje de remoción en función de la cantidad de biosorbente al utilizar partículas de tamaño 0,6 mm; el tiempo de contacto propuesto fue de 3 minutos a 25 °C con pH =11. La tendencia observada muestra que el porcentaje de remoción de cobre divalente aumenta en función de la cantidad de biosorbente; el comportamiento se asemeja a una línea recta, reflejado en el coeficiente de correlación $R^2 = 0,948$. Luego de utilizar el método estadístico de análisis de varianzas Anova, se corroboró que existen diferencias significativas, entre los valores medios del porcentaje de remoción de cobre divalente y las distintas cantidades de cáscara de banano de 0,6 mm, con las que se llevó a cabo el análisis.

De la misma manera, las figuras 3 y 4 relacionan el porcentaje de remoción de cobre divalente en función de la cantidad de biosorbente, al utilizar partículas de tamaño 1,68 mm y 2 mm respectivamente. El tiempo de contacto propuesto fue de 3 minutos a 25 °C con pH =11. En esta ocasión, las tendencias observadas reflejan que el porcentaje de remoción de cobre divalente aumenta en función de la cantidad de biosorbente hasta utilizar 0,2

gramos, en donde posteriormente; los porcentajes de remoción de cobre divalente decaen.

Los coeficientes de correlación de las gráficas son $R^2 = 0,908$ y $R^2 = 0,912$ respectivamente, demostraron que tenían un comportamiento lineal hasta llegar a la cantidad límite de 0,2 gramos. La tendencia mostrada se debe a que al aumentar el tamaño de partícula, la materia prima despidе más color y el método colorimétrico empieza a ser vulnerable. Cabe destacar que al realizar el análisis de varianza Anova de los datos de las figuras 3 y 4, se corroboró que al igual que con el tamaño de partícula de 0,6 mm, existen diferencias significativas entre los valores medios del porcentaje de remoción de cobre divalente y las distintas cantidades de cáscara de banano de 1,68 mm y 2 mm respectivamente.

Se puede decir que bajo estos parámetros, la cantidad de materia prima agregada incide significativamente en el porcentaje de remoción de cobre divalente, teniendo mejores resultados con un tamaño de partícula menor como la de 0,6 mm y una cantidad de biosorbente adecuada de 0,2 gramos.

La figura 5 relaciona el porcentaje de remoción de cobre divalente en función del tiempo de contacto al utilizar 0,2 gramos de materia prima de tamaño 0,6 mm a 25 °C con pH =11. En ella se puede observar que el porcentaje de remoción presenta una tendencia que no varía de manera abrupta conforme avanza el tiempo de contacto. Esto concuerda con lo expresado en el trabajo de graduación doctoral de la doctora Milena Boniolo, *Biossorção de urânio nas cascas de banana* ya que se determinó que la capacidad de adsorción de la cáscara de banano llega a su límite en el menor tiempo de contacto evaluado.

Posteriormente, se realizó el análisis de varianza Anova para los datos de la figura 5, y se corroboró que no existen diferencias significativas entre los valores medios del porcentaje de remoción de cobre divalente y los distintos tiempos de contacto en los que se ha llevado a cabo el análisis. Se afirma que el tiempo de contacto no incide de manera significativa en el porcentaje de remoción de cobre divalente, por lo que se concluye que el tiempo de contacto adecuado para la experimentación es de 3 minutos.

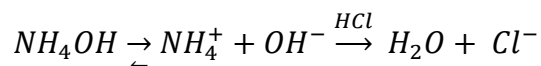
Por otro lado, la Figura 6 relaciona el porcentaje de remoción de cobre divalente en función de la temperatura, al utilizar 0,2 gramos de materia prima de tamaño 0,6 mm con un tiempo de contacto de 3 minutos a 25 °C con pH =11.

La gráfica presenta una tendencia descendente del porcentaje de remoción conforme la temperatura aumenta; no tuvo cambios notorios pero fue acorde a lo expresado en el trabajo de graduación doctoral de la doctora Milena Boniolo, *Biossorção de urânio nas cascas de banana*. Aquí se considera que el proceso de adsorción realizado es exotérmico, ya que la adición de energía en forma de calor provoca una agitación de los iones y moléculas del sistema. Esto se traduce en una disminución de retención de las mismas en la superficie del absorbente.

Con el objetivo de darle una validez estadística a los resultados obtenidos, se realizó el análisis de varianza Anova; esto dio como resultado que no existen diferencias significativas entre los valores medios del porcentaje de remoción de cobre divalente y las distintas temperaturas a las que se llevó a cabo el análisis. Se afirma que, al igual que el tiempo de contacto, la temperatura no incide de manera significativa en el porcentaje de remoción de

cobre divalente. Se determinó que la temperatura para la experimentación, con base en lo anterior, es de 25 °C.

En la figura 7 se puede observar el porcentaje de remoción de cobre divalente en función del pH al utilizar 0,2 gramos de materia prima de tamaño 0,6 mm, con un tiempo de contacto de 3 minutos a 25 °C. Inicialmente se tenía planeado utilizar un rango de pH ácido para la experimentación, pero dada la naturaleza básica del complejo formado, se prefirió no hacerlo. Al utilizar un ácido fuerte como prueba para disminuir el pH se dio una reacción de neutralización:



En donde el equilibrio se desplazó a la derecha e hizo que se consumiera el amoníaco (NH₃) presente. Esto provocó que el color azul de la solución se pierda y por tanto hizo inválido el método espectrofotométrico propuesto bajo estas condiciones. La tendencia de la gráfica muestra que mientras menor sea el pH, mejor es el porcentaje de remoción, demostrando que el pH=8 es el más indicado para trabajar, pero al ser demasiado cercano a la neutralidad, y para no correr riesgos de una reacción de neutralización entre el ácido clorhídrico y el amoníaco, se prefirió tomar el pH =11 como pH de trabajo más adecuado.

Por otro lado, los datos obtenidos fueron analizados mediante el método de varianzas Anova. El resultado determinó que existen diferencias significativas entre los valores medios del porcentaje de remoción de cobre divalente y los distintos pH a los que se llevó a cabo el análisis. Por ello se dice que el pH incide de manera significativa en el porcentaje de remoción del cobre divalente.

Por último, se realizaron isothermas de adsorción al utilizar 50 mg de cáscara de banano de 0,6 mm, a 25 °C con un tiempo de contacto de 50 minutos y un pH= 11. El objetivo es visualizar de mejor manera el comportamiento del fenómeno de biosorción del cobre divalente en la cáscara de banano, dando como resultado las figuras 8 y 9, siendo las isothermas de Freundlich y Langmuir, respectivamente.

Ambas gráficas presentan un comportamiento lineal, con $R^2 = 0,8839$ y $R^2 = 0,9717$, respectivamente. Con ello se dice que la isoterma de Langmuir es más efectiva a la hora de describir el comportamiento de la biosorción de cobre divalente en la cáscara de banano bajo las condiciones que se determinaron y dieron como resultado el mejor porcentaje de remoción.

CONCLUSIONES

1. La cáscara de banano puede reducir la concentración de cobre divalente en una solución de sulfato de cobre pentahidratado en un 12 % al utilizar 0,2 gramos de cáscara de banano de 0,6 mm, con un tiempo de contacto de 5 minutos a 25 °C y pH =11.
2. El método espectrofotométrico propuesto es funcional, pero presenta limitaciones en la cantidad de biosorbente a utilizar, debido a la porción de pigmentos del material que interfieren en la lectura.
3. Mientras menor sea el tamaño de partícula utilizado en la experimentación, se logran mejores porcentajes de remoción de cobre divalente de una solución de sulfato de cobre pentahidratado.
4. La cantidad de biosorbente adecuada para la remoción de cobre divalente de una solución de sulfato de cobre pentahidratado es de 0,2 gramos en un volumen de 25 mL de solución.
5. El tiempo de contacto no incide de manera significativa en la remoción de cobre divalente de una solución de sulfato de cobre pentahidratado, por lo que se propone un tiempo de contacto de 3 minutos.
6. La temperatura no incide de manera significativa en la remoción de cobre divalente de una solución de sulfato de cobre pentahidratado por lo que se propone una temperatura de trabajo de 25 °C.

7. El pH para la remoción de cobre divalente de una solución de sulfato de cobre pentahidratado es $\text{pH}=11$.
8. La isoterma de Langmuir describe de mejor manera la biosorción de cobre divalente en la cáscara de banano en comparación con la isoterma de Freundlich.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar un espectrofotómetro de absorción atómica (AA) para obtener datos más confiables acerca de las concentraciones de cobre divalente y del porcentaje de remoción del mismo en la solución de sulfato de cobre pentahidratado mediante la biosorción de la cáscara de banano.
2. Realizar la limpieza de la cáscara de banano antes del secado, sumergiéndola en agua destilada durante un tiempo prudente para intentar remover el pigmento que despide.
3. Realizar la determinación de la concentración de cobre divalente en la solución de sulfato de cobre pentahidratado, antes y después de los tratamientos mediante una técnica volumétrica redox.

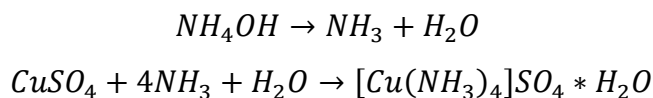
BIBLIOGRAFÍA

1. CABARCAS, Henao Esteban. *Extracción y caracterización de pectina a partir de cáscaras de plátano para desarrollar un diseño general del proceso de producción*. Trabajo de graduación. Universidad de Cartagena, Colombia, 2,010.
2. CASTELLANOS, Gilbert. *Fisicoquímica*. 2a ed. México: Addison Wesley Iberoamericana, 1998. 697 p.
3. CHRISTEN, Hans Rudolf. *Fundamentos de la química general e inorgánica*. Barcelona: Ed. Reverté, 1986. 391 p.
4. FACSA, Gimeno servicios. *Metales pesados* [en línea]. <[http://www.facsa.com/el-agua/calidad/Metales% 20pesados#.VEQ29fmG965](http://www.facsa.com/el-agua/calidad/Metales%20pesados#.VEQ29fmG965)>. [Consultado: 19 de octubre de 2014].
5. HARRIS, D. C. *Análisis Químico Cuantitativo*. 3a ed. EE.UU. Reverté, 2007. 318 p.
6. HERBERT, Dormond H. *Evaluación preliminar de la cascara de banana Maduro como material de ensilaje, en combinación con pasto King Grass (Pennisetum purpureum) (Nota técnica)*. Universidad de Costa Rica. Costa Rica, 2011.
7. HIGSON, Seamus. *Química analítica*. México: Mc Grawl Hill. 2007. 415 p.

8. IZQUIERDO, José. *Cinética de las reacciones químicas*. Barcelona, Reverté: 2004. 611 p.
9. KATZ, Miguel. *Fisicoquímica de superficies*. Documento PDF. [en línea]. <http://www.rlabato.com/isp/qui/qui_fis_2011-010.pdf>. [Consultado: 19 de octubre de 2014].
10. PERRY, Robert. *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. Green Don (edit. Lit). 8a ed. EE.UU.: McGraw-Hill, 2008. 478 p.
11. RODRÍGUEZ BONIOLO, Milena. *Biossorção de urânio nas cascas de banana*. Trabajo de graduación doctoral. Universidad de Sao Pablo, Brasil. 2008 348 p.
12. SAMPIERI, Roberto. *Metodología de la investigación*. 4a ed. México: Editorial Mc Graw Hill. 2006.
13. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID. *Práctica 4 Colorimetría. Ley de Lambert-Beer*. Docencia, química general [en línea]. <http://www.uam.es/docencia/qmapcon/QUIMICA_GENERAL/Practica_4_Colorimetria_Ley_de_Lambert_Beer.pdf>. [Consultado: 15 de octubre de 2014].
14. UNIVERSIDAD JAUME I DE CASTELLON. *Recursos hídricos - lecciones*. Instituto Universitario de plaguicidas y aguas [en línea]. <<http://www.agua.uji.es/rh%20lecciones07.html>>. [Consultado: 15 de octubre de 2014].

APÉNDICES

Apéndice 1. Reacciones involucradas en la formación del complejo



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Estequiometría

2.1 Moles de Sulfato de cobre pentahidratado

$$0.1 M CuSO_4 * \frac{1 L}{1000 mL} * 1 mL CuSO_4 = 0.00010 mol CuSO_4 * 5H_2O$$

2.2 Moles de amoníaco necesarios

$$0,0001 mol CuSO_4 * \frac{4 mol NH_3}{1 mol CuSO_4} = 0,0004 mol NH_3$$

2.3 Moles de amoníaco adicionados con $\rho = 0.9 g/mL$ al 25%

$$5 mL sln * \frac{0.9 g sln}{mL sln} * \frac{25 g NH_4OH}{100 g sln} * \frac{1 mol NH_4OH}{35 g NH_4OH} * \frac{1 mol NH_3}{1 mol NH_4OH} = 0,032 mol NH_3$$

2.4 Moles de amoníaco en exceso

$$0,032 mol NH_3 - 0,0004 mol NH_3 = 0,0316 mol NH_3$$

2.5 Moles de sulfato de tetraamin cobre formados

$$0,0001 \text{ mol } CuSO_4 * 5H_2O * \frac{1 \text{ mol } [Cu(NH_3)_4]SO_4}{1 \text{ mol } CuSO_4 * 5H_2O} = 0,00010 \text{ mol } [Cu(NH_3)_4]SO_4$$

2.6 Concentración de sulfato de tetraamin cobre formados

$$\frac{0,00010 \text{ mol } [Cu(NH_3)_4]SO_4}{0,025 \text{ L}} = 0,004 \frac{\text{mol } [Cu(NH_3)_4]SO_4}{L}$$

2.7 Concentración de sulfato de tetraamin cobre formados en g/L

$$0,004 \frac{\text{mol } [Cu(NH_3)_4]SO_4}{L} * \frac{249,68 \text{ g } [Cu(NH_3)_4]SO_4}{1 \text{ mol } [Cu(NH_3)_4]SO_4} \\ = 0,99872 \text{ mol } [Cu(NH_3)_4]SO_4$$

2.8 Moles de cobre divalente formados

$$0,0001 \text{ mol } CuSO_4 * 5H_2O * \frac{1 \text{ mol } Cu^{+2}}{1 \text{ mol } CuSO_4 * 5H_2O} = 0,00010 \text{ mol } Cu^{+2}$$

2.9 Concentración de Cu^{+2} en aforo de 25 mL

$$\frac{0,00010 \text{ mol } Cu^{+2}}{0,025 \text{ L}} * \frac{63,543 \text{ g } Cu^{+2}}{1 \text{ mol } Cu^{+2}} = \frac{0,2541 \text{ g } Cu^{+2}}{L}$$

Fuente: elaboracion propia.

Apéndice 3. **Datos para la elaboración de la curva de calibración del método espectrofotométrico**

Concentración de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ *	mL usados	Moles de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ *	mL de hidróxido de amonio	Moles de $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4^*$ H_2O	Concentración de $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4^*$ H_2O	g/L de $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4^*$ H_2O
0,1	1,0	0,00010	5,0	0,00010	0,004	0,99872
0,1	2,5	0,00025	5,0	0,00025	0,010	2,4968
0,1	3,5	0,00035	5,0	0,00035	0,014	3,49552
0,1	5,0	0,00050	5,0	0,00050	0,020	4,9936
0,1	6,0	0,00060	5,0	0,00060	0,024	5,99232
0,1	7,5	0,00075	5,0	0,00075	0,030	7,4904
0,1	8,5	0,00085	5,0	0,00085	0,034	8,48912
0,1	10,0	0,0010	5,0	0,0010	0,040	9,9872

Fuente: elaboración propia.

g/L de Cu^{+2}	Absorbancia
0,254172	0,213
0,63543	0,478
0,889602	0,677
1,27086	1,03
1,525032	1,16
1,90629	1,531
2,160462	1,668
2,54172	2,005

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Datos para la elaboración de la curva cantidad de cáscara de banano vs porcentaje de remoción de 0,6 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 3 minutos y pH = 11**

Primer tratamiento

Gramos Cáscara	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
0	1,531	1,95	0,00	0,00
0,05	1,433	1,83	0,06	6,38
0,1	1,41	1,80	0,08	7,88
0,15	1,3	1,66	0,15	15,04
0,2	1,314	1,68	0,14	14,12
0,25	1,308	1,67	0,15	14,52
0,3	1,243	1,59	0,19	18,75
0,4	1,142	1,46	0,25	25,32

Fuente: elaboración propia.

Segundo tratamiento

Gramos Cáscara	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
0	1,531	1,95	0,00	0,00
0,05	1,445	1,84	0,06	5,60
0,1	1,425	1,82	0,07	6,90
0,15	1,325	1,69	0,13	13,41
0,2	1,31	1,67	0,14	14,39
0,25	1,305	1,66	0,15	14,71
0,3	1,247	1,59	0,18	18,49
0,4	1,165	1,49	0,24	23,82

Fuente: elaboración propia.

Tercer tratamiento

Gramos Cáscara	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
0	1,531	1,95	0,00	0,00
0.05	1,395	1,78	0,09	8,85
0.1	1,378	1,76	0,10	9,96
0.15	1,325	1,69	0,13	13,41
0.2	1,291	1,65	0,16	15,62
0.25	1,277	1,63	0,17	16,53
0.3	1,225	1,56	0,20	19,92
0.4	1,191	1,52	0,22	22,13

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Datos para la elaboración de la curva cantidad de cáscara de banano vs porcentaje de remoción de 1,68 mm a 25°C con un tiempo de contacto de 3 minutos y pH = 11

Primer tratamiento

Gramos Cáscara	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
0	1,531	1,95	0,00	0,00
0,05	1,421	1,81	0,07	7,16
0,1	1,404	1,79	0,08	8,27
0,15	1,378	1,76	0,10	9,96
0,2	1,346	1,72	0,12	12,04
0,25	1,397	1,78	0,09	8,72
0,3	1,404	1,79	0,08	8,27
0,4	1,377	1,76	0,10	10,02

Fuente: elaboración propia.

Segundo tratamiento

Gramos Cáscara	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
0	1,531	1,95	0,00	0,00
0,05	1,429	1,82	0,07	6,64
0,1	1,409	1,80	0,08	7,94
0,15	1,389	1,77	0,09	9,24
0,2	1,331	1,70	0,13	13,02
0,25	1,376	1,75	0,10	10,09
0,3	1,421	1,81	0,07	7,16
0,4	1,387	1,77	0,09	9,37

Fuente: elaboración propia.

Tercer tratamiento

Gramos Cáscara	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
0	1,531	1,95	0,00	0,00
0,05	1,409	1,80	0,08	7,94
0,1	1,4	1,78	0,09	8,53
0,15	1,361	1,74	0,11	11,07
0,2	1,323	1,69	0,14	13,54
0,25	1,386	1,77	0,09	9,44
0,3	1,393	1,78	0,09	8,98
0,4	1,368	1,74	0,11	10,61

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Datos para la elaboración de la curva cantidad de cáscara de banano vs porcentaje de remoción de 2 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 3 minutos y pH = 11**

Primer tratamiento

Gramos Cáscara	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
0	1,535	1,96	0,00	0,00
0,05	1,446	1,84	0,06	5,78
0,1	1,428	1,82	0,07	6,95
0,15	1,392	1,77	0,09	9,28
0,2	1,349	1,72	0,12	12,08
0,25	1,404	1,79	0,09	8,50
0,3	1,425	1,82	0,07	7,14
0,4	1,457	1,86	0,05	5,06

Fuente: elaboración propia.

Segundo tratamiento

Gramos Cáscara	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
0	1,535	1,96	0,00	0,00
0,05	1,45	1,85	0,06	5,52
0,1	1,435	1,83	0,06	6,49
0,15	1,398	1,78	0,09	8,89
0,2	1,362	1,74	0,11	11,23
0,25	1,41	1,80	0,08	8,12
0,3	1,432	1,83	0,07	6,69
0,4	1,46	1,86	0,05	4,87

Fuente: elaboración propia.

Tercer tratamiento

Gramos Cáscara	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
0	1,535	1,96	0,00	0,00
0,05	1,438	1,83	0,06	6,30
0,1	1,42	1,81	0,07	7,47
0,15	1,386	1,77	0,10	9,67
0,2	1,338	1,71	0,13	12,79
0,25	1,398	1,78	0,09	8,89
0,3	1,412	1,80	0,08	7,99
0,4	1,444	1,84	0,06	5,91

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Datos para la elaboración de la curva tiempo de contacto vs porcentaje de remoción utilizando 0,2 g de cáscara de banano de 0,6 mm a 25°C y pH = 11

Primer tratamiento

Tiempo (min)	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
0	1,535	1,96	0,00	0,00
3	1,341	1,71	0,13	12,59
10	1,365	1,74	0,11	11,04
25	1,376	1,75	0,10	10,32
30	1,36	1,73	0,11	11,36
35	1,34	1,71	0,13	12,66
45	1,376	1,75	0,10	10,32
60	1,339	1,71	0,13	12,72

Fuente: elaboración propia.

Segundo tratamiento

Tiempo (min)	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
0	1,535	1,96	0,00	0,00
3	1,331	1,70	0,13	13,24
10	1,347	1,72	0,12	12,21
25	1,367	1,74	0,11	10,91
30	1,34	1,71	0,13	12,66
35	1,282	1,64	0,16	16,43
45	1,356	1,73	0,12	11,62
60	1,329	1,69	0,13	13,37

Fuente: elaboración propia.

Tercer tratamiento

Tiempo (min)	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
0	1,535	1,96	0,00	0,00
3	1,344	1,71	0,12	12,40
10	1,358	1,73	0,11	11,49
25	1,381	1,76	0,10	10,00
30	1,366	1,74	0,11	10,97
35	1,367	1,74	0,11	10,91
45	1,382	1,76	0,10	9,93
60	1,353	1,73	0,12	11,82

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Datos para la elaboración de la curva temperatura vs porcentaje de remoción utilizando 0,2 g de cáscara de banano de 0,6 mm con un tiempo de contacto de 3 minutos y pH = 11**

Primer tratamiento

Temperatura (°C)	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
-	1,535	1,96	0,00	0,00
10	1,345	1,72	0,12	12,34
15	1,366	1,74	0,11	10,97
20	1,363	1,74	0,11	11,17
25	1,396	1,78	0,09	9,02
30	1,404	1,79	0,09	8,50
40	1,385	1,77	0,10	9,74
45	1,369	1,75	0,11	10,78

Fuente: elaboración propia.

Segundo tratamiento

Temperatura (°C)	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
-	1,535	1,96	0,00	0,00
10	1,331	1,70	0,13	13,24
15	1,347	1,72	0,12	12,21
20	1,367	1,74	0,11	10,91
25	1,34	1,71	0,13	12,66
30	1,282	1,64	0,16	16,43
40	1,356	1,73	0,12	11,62
45	1,329	1,69	0,13	13,37

Fuente: elaboración propia.

Tercer tratamiento

Temperatura (°C)	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
-	1,535	1,96	0,00	0,00
10	1,349	1,72	0,12	12,08
15	1,362	1,74	0,11	11,23
20	1,366	1,74	0,11	10,97
25	1,391	1,77	0,09	9,35
30	1,395	1,78	0,09	9,09
40	1,381	1,76	0,10	10,00
45	1,36	1,73	0,11	11,36

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Datos para la elaboración de la curva pH vs porcentaje de remoción utilizando 0,2 g de cáscara de banano de 0,6 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 3 minutos**

Primer tratamiento

pH	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
11,06	1,535	1,96	0,00	0,00
10,4	1,3669	1,74	0,11	10,91
9,7	1,3682	1,74	0,11	10,83
8,6	1,312	1,67	0,14	14,48
8	1,3	1,66	0,15	15,26

Fuente: elaboración propia.

Segundo tratamiento

pH	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
11,06	1,535	1,96	0,00	0,00
10,4	1,3579	1,73	0,11	11,50
9,7	1,3592	1,73	0,11	11,41
8,6	1,306	1,67	0,15	14,87
8	1,307	1,67	0,15	14,80

Fuente: elaboración propia.

Tercer tratamiento

pH	Absorbancia	C (g/L)	Remoción	% Remoción
11,06	1,535	1,96	0,00	0,00
10,4	1,3829	1,76	0,10	9,87
9,7	1,3752	1,75	0,10	10,37
8,6	1,315	1,68	0,14	14,28
8	1,296	1,65	0,16	15,52

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Datos para la elaboración de las isotermas de adsorción utilizando 50 mg de cáscara de banano de 0,6 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 50 minutos y pH = 11**

[]CuSO ₄ * 5H ₂ O	Absorbancia inicial	Absorbancia final	Ca inicial (g/L)	Ca final (g/L)	Ca inicial (mol/L)	C final (mol/L)
0,01	0,331	0,297	0,427156103	0,383970532	0,006722633	0,006042973
0,02	0,557	0,494	0,714213133	0,634192811	0,01124037	0,009981001
0,03	0,839	0,739	1,07239934	0,945382954	0,016877547	0,014878548
0,05	1,21	1,096	1,543630128	1,398831449	0,024293833	0,022014974
0,07	1,558	1,392	1,985647148	1,774799949	0,031250349	0,027932011
0,08	1,685	1,484	2,146957958	1,891655023	0,033789077	0,029771089
0,1	2,913	2,737	3,706719167	3,483170329	0,058336783	0,054818545

Fuente: elaboración propia.

Moles inicial	Moles final	Moles adsorbidos	% Reducción
6,72263E-05	6,04297E-05	6,7966E-06	10,11
0,000112404	9,981E-05	1,25937E-05	11,20
0,000168775	0,000148785	1,999E-05	11,84
0,000242938	0,00022015	2,27886E-05	9,38
0,000312503	0,00027932	3,31834E-05	10,62
0,000337891	0,000297711	4,01799E-05	11,89
0,000583368	0,000548185	3,51824E-05	6,03

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Datos para la elaboración de las isoterma de Freundlich utilizando 50 mg de cáscara de banano de 0,6 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 50 minutos y pH = 11**

X	log (x)	log (Ca final)
0,00856371	-2,067338	-2,21874931
0,01586805	-1,79947637	-2,0008259
0,02518739	-1,59881692	-1,82743944
0,02871362	-1,54191207	-1,65728182
0,04181106	-1,37870883	-1,5538978
0,05062664	-1,29562086	-1,52620527
0,0443298	-1,35330425	-1,2610725

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Datos para la elaboración de las isoterma de Langmuir utilizando 50 mg de cáscara de banano de 0,6 mm a 25 °C con un tiempo de contacto de 50 minutos y pH = 11.**

q	1/q	1/Ca
0,00856371	116,771807	165,481449
0,01586805	63,0197052	100,19035
0,02518739	39,7024143	67,2108585
0,02871362	34,8266792	45,4236284
0,04181106	23,917117	35,8012181
0,05062664	19,7524449	33,5896341
0,0443298	22,5581899	18,242002

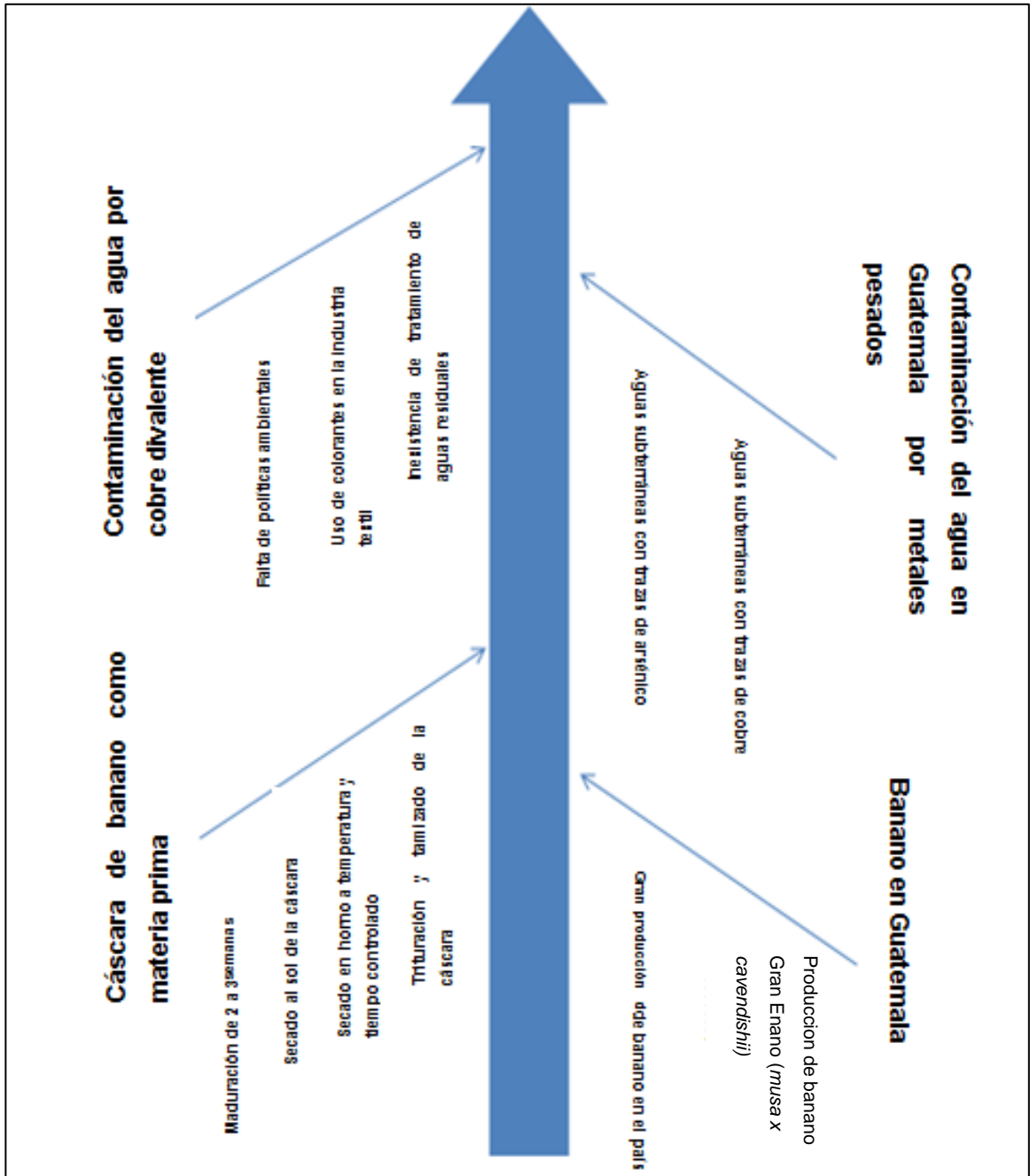
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Tabla de requisitos académicos**

ÁREA DE ESTUDIO	CURSOS ACADÉMICOS
Química	Química 4
	Análisis Cuantitativo
	Análisis Instrumental
	Química Ambiental
	Química Orgánica 1 y 2
Fisicoquímica	Laboratorio de Fisicoquímica 1
	Fisicoquímica 2
	Laboratorio de Fisicoquímica 2
Complementaria	Área de Matemática
	Área de Física
	Estadística 1 y 2
	Programación de Computadoras

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. Diagrama Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Preparación de la solución de sulfato de cobre pentahidratado 0,1 molar y espectrofotómetro UV-visible



Fuente: Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ingeniería, Usac.

Anexo 2. **Preparación de las distintas soluciones de sulfato de tetraamin cobre para realizar la curva de calibración**



Fuente: Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ingeniería, Usac.

Anexo 3. **Pruebas preliminares de secado y preparación de la materia prima a utilizar mediante horno de secado al vacío en LIEXVE**



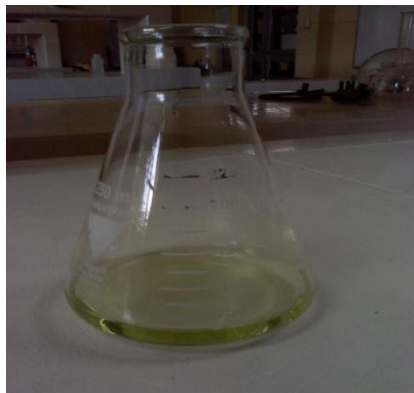
Fuente: Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales, Usac.

Anexo 4. **Secado en horno transversal de bandejas, trituración y tamizado de la materia prima a utilizar en LIEXVE**



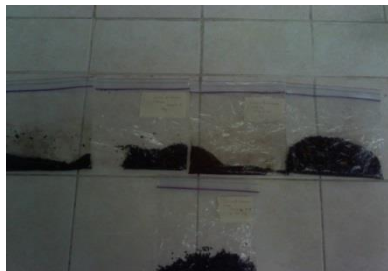
Fuente: Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales, Usac.

Anexo 5. **Problemática con la decoloración amarilla de la cáscara de banano y coloración verdosa de las soluciones**



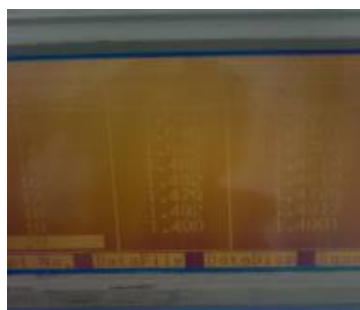
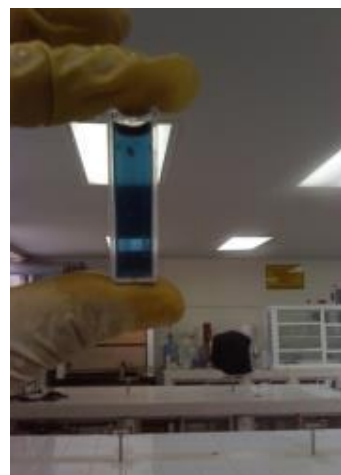
Fuente: Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ingeniería, Usac.

Anexo 6. **Cristalería y cáscara de banano separada, lista para mezclarla con las soluciones**



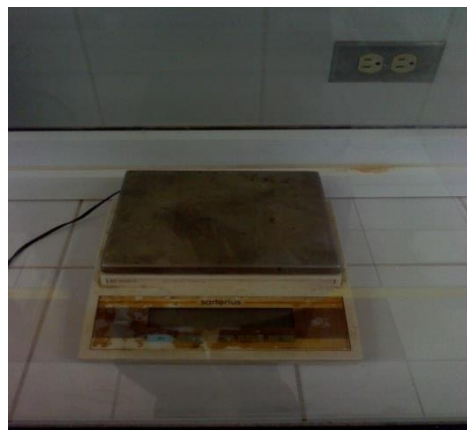
Fuente: Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ingeniería, Usac.

Anexo 7. Mezclado, filtrado y medición de absorbancia



Fuente: Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ingeniería, Usac.

Anexo 8. Equipo auxiliar utilizado



Fuente: Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ingeniería, Usac.

Anexo 9. **Autor en el laboratorio de Fisiología de la Fiusac, Usac**



Fuente: Laboratorio de Fisiología de la Facultad de Ingeniería, Usac.

Anexo 10. **Composición porcentual de la cáscara de banano**

Componentes Porcentaje de MS	Cáscara de banano *
Humedad	86,6
Materia Seca	13,4
Proteína Cruda	10,45
Extracto Etéreo	8,5
Fibra Cruda	14,18
Extracto Libre de Nitrógeno	54,48
Cenizas	12,69
CHOSNE***	18,55
Azúcares Reductores ****	22
Energía Bruta, Kcal/kg MS*****	5106
Calcio	0,37
Fósforo	0,187
Potasio	8,96
Magnesio	0,157
Hierro, mg/kg	134,3
Fibra Neutro Detergente	50,1
Fibra Ácido Detergente	42,8
Silica	4,55
Lignina	8,21
Celulosa	1,43
Hemicelulosa, %	

Fuente: Centro de Investigación en Nutrición Animal, UCR.

