

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA**



**EVALUACION DE ABSORCION DE PLOMO Y CADMIO EN SOLUCION
ACUOSA DE FLUJO CONTINUO UTILIZANDO BROZA DE *Coffea arabica***

TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR

TERESA DEL CARMEN CONTRERAS MARTINEZ

PARA OPTAR AL GRADO DE

LICENCIADA EN QUIMICA Y FARMACIA

ABRIL 2022

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTRO AMERICA.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

MAESTRO ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL

MAESTRO FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA

DECANA

LICDA. REINA MARIBEL GALDAMEZ

SECRETARIA

LICDA. EUGENIA SORTO LEMUS

DIRECCION DE PROCESOS DE GRADUACION

DIRECTORA GENERAL

MSc. Cecilia Haydeé Gallardo de Velásquez.

TRIBUNAL CALIFICADOR

ASESORES DE AREA EN APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES

Dr. David Francisco Torres Romero

MSc. Morena Lizette Martínez de Díaz

DOCENTES ASESORES

Ing. Sergio Armando Maravilla Miranda

Lic. Ulises Oswaldo Guardado Castillo

AGRADECIMIENTOS

A Dios todo poderoso por darme la oportunidad de alcanzar una meta más en mi vida académica, por darme sabiduría y salud para seguir adelante y superar todos los obstáculos que tuve en el camino de toda mi carrera.

A mis asesores de tesis Ing. Sergio Armando Maravilla y Lic. Ulises Oswaldo Guardado Castillo por toda su asesoría durante este proceso de tesis por la enorme paciencia que tuvieron hacia mi persona, dedicación a este proyecto y ayudarme a culminar mi formación profesional.

A la directora de trabajo de graduación MSc. Cecilia Gallardo por su tiempo al brindarme correcciones para la redacción de mi investigación y motivarme a seguir adelante en mi proceso. A mis jurados Doctor David Francisco Torres y MSc. Morena Lizette Martínez por brindarme su preciado tiempo para realizar las correcciones pertinentes y así mejorar el desarrollo de mi investigación.

Al personal docente del Laboratorio de Investigación en Productos Naturales de la Facultad de Química y Farmacia y al Laboratorio del Departamento de Química Agrícola de la Facultad de Ciencia Agronómicas, por brindarme su apoyo al prestar sus instalaciones y equipos durante el desarrollo de mi investigación.

A don Miguel Ángel Portillo Chacón, propietario de la Finca El Zapote, por brindarme su apoyo y darme la oportunidad de conocer su finca y facilitarme la información necesaria para el desarrollo de mi investigación. Gracias por permitirme enaltecer su Café en este proyecto tan hermoso.

Carmen Contreras

DEDICATORIA

Primeramente, dar gracias a **DIOS TODO PODEROSO**, por permitirme escribir estas palabras, por darme las fuerzas y la salud necesaria para terminar mi carrera y llevar mi proceso de tesis.

Este triunfo se los dedico a mis padres Ester Martínez y Víctor Contreras. No encuentro la manera de darle gracias a mi mami por siempre confiar en mí y darme la oportunidad de cumplir este sueño gracias por todos tus esfuerzos y sacrificios que ahora tienen su fruto. Este enorme triunfo es tuyo mami. Y sé que desde el cielo Papá está más que orgulloso y feliz de su chikita, gracias por siempre ser esa hermosa estrella que ha guiado mi camino. Tu niña lo logro mi viejo. Me hubiera encantado que tus ojos vieran todos mis logros, pero desde arriba sé que estas orgulloso de todos nosotros.

A mis hermanos Marle, César, José Carlos y Josué, a mis sobrinitas Abigail y Scartett, por el enorme apoyo que me brindaron en todos estos años, este logro es de todos. Gracias por confiar en que culminaría mi carrera. ¡Lo Logramos!

A mi mejor amigo José Flores por siempre estar ahí apoyándome y alentarme a terminar este proceso, por soportar mis cambios de humor, por darme palabras de aliento y no dejarme caer en todo este tiempo, gracias por ser mi amigo, mi confidente y compañero de carrera.

Gracias a mi equipo de Farmacia ISSS Santa Ana por el apoyo que han brindado todo este tiempo, en especial a Jessica Cuellar, Moisés Herrera, Carmen Ramos, Cleofe de Castillo y mi jefa Tete Castillo por siempre tener una palabra de motivación y apoyo en este largo proceso llamado tesis.

Chiky.

ÍNDICE GENERAL

	Pág. N°
RESUMEN	
CAPITULO I	
1.0 INTRODUCCION.	xvii
CAPITULO II	
2.0 OBJETIVOS.	
CAPITULO III	
3.0 MARCO TEORICO.	22
3.1 Generalidades de la familia Rubiaceae.	22
3.2 Descripción botánica del “café”.	23
3.3 Origen y distribución del “café”.	23
3.4 Historia del “café” en El Salvador	24
3.5 Distribución de las variedades de “café” en El Salvador.	26
3.6 Propiedades del “café”.	30
3.7 Bioremediadores.	32
3.7.1 Los metales de interés en el proceso de bioadsorción.	35
3.7.2 Aplicación de los modelos matemáticos a la biosorción en columna.	35
3.7.3 Modelos matemáticos del proceso de biosorción en columna.	36
3.7.3.1 Modelo de Thomas	36
3.7.3.2 Isoterma de Langmuir	37
3.7.3.3 Modelo Dosis-Respuesta	38
3.7.4 Capacidad máxima de remoción de plomo y cadmio de la broza de “café”.	40
3.8 Metales pesados.	40
3.8.1 Plomo.	43

3.8.1.1	Generalidades del plomo.	43
3.8.1.2	Fuentes naturales de plomo.	44
3.8.1.3	Efectos tóxicos del plomo en el ser humano	44
3.8.2	Cadmio.	46
3.8.2.1	Generalidades del cadmio	46
3.8.2.2	Fuentes naturales de cadmio.	46
3.8.2.3	Efectos tóxicos del cadmio en el ser humano.	46
3.9	Marco legal acerca de cadmio y plomo en El Salvador.	47
3.9.1	Contaminación del agua por metales pesados	48
3.9.2	Valores permisibles de plomo y cadmio.	49
3.10	Métodos para determinar metales pesados.	50
3.10.1	Espectrofotometría de Absorción Atómica.	50
3.10.1.1	Generalidades del método.	50
3.10.1.2	Descripción de la técnica	50
3.10.2	La Espectrofotometría de Absorción Atómica Electrotérmica.	51
3.10.2.1	Equipo de Absorción Atómica.	52
3.10.2.2	Aplicaciones	53
3.10.2.3	Algunas características importantes de la Espectrofotometría de Absorción Atómica.	54
3.10.3	La Espectrofotometría de Absorción Atómica con Horno de Grafito.	54
3.10.3.1	Generalidades del método.	54
3.10.3.2	Descripción de la técnica.	54
CAPITULO IV		
4.0	DISEÑO METODOLOGICO	57
4.1	Tipo de Estudio.	57
4.2	Investigación Bibliográfica	57
4.3	Investigación de Campo.	57

4.3.1 Recolección de la muestra vegetal.	58
4.3.2 Prensado de la muestra vegetal.	58
4.3.3 Secado del ejemplar.	58
4.3.4 Recolección, Secado y Trillado de los frutos de “café”.	58
4.4 Identificación botánica de la muestra de “café”.	59
4.5 Parte Experimental.	59
4.5.2 Preparación de la broza de “café”.	60
4.5.2.1 Preparación de la broza de “café” por Cafetera Doméstica.	60
4.5.2.2 Preparación de la broza de “café” por Aparato Soxhlet.	60
4.5.3 Preparación de la solución estándar de 100 ppm de plomo y 60 ppm de cadmio a partir de las sales de nitrato de cadmio tetrahidratado y nitrato de plomo.	60
4.5.4.1 Calibración de pH de la solución estándar de 100 ppm de plomo y 60 ppm de cadmio a partir de las sales de nitrato de cadmio tetrahidratado y nitrato de plomo a pH 6.	61
4.5.5 Preparación de la columna del biosorbente.	61
4.6 Metodología para determinar metales pesados por medio de Espectrometría de Absorción Atómica.	62
4.6.1 Determinación de plomo por Espectrofotometría de Absorción Atómica.	62
4.6.1.1 Fundamento teórico.	62
4.6.1.2 Tratamiento de la muestra (Digestión con Ácido Clorhídrico).	62
4.6.1.3 Medición de las muestras de plomo.	62
4.6.2 Determinación de cadmio por Espectrometría de Absorción Atómica	63
4.6.2.1 Fundamento teórico.	64

4.6.2.2 Tratamiento de la muestra (Digestión con Ácido Clorhídrico).	64
4.6.2.3 Medición de las muestras de cadmio	64
4.7 Análisis Estadísticos.	65
4.7.1 Aplicación de los modelos matemáticos a la bioadsorción en columna.	65
4.7.1.1 Modelo Dosis Respuesta	66
4.7.1.2 Modelo de Thomas	66
4.7.1.3 Isoterma de Langmuir	67
4.7.2 Capacidad máxima de remoción de plomo y cadmio de la broza de “café”.	67
4.7.3 Porcentaje de remoción de los metales pesados cadmio y plomo.	68
CAPITULO V	
5.0 RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS ESTUDIO.	70
5.1 Identificar botánicamente la especie de <i>Coffea Arabica</i> a utilizar en el estudio.	70
5.2 Preparar una columna de flujo continuo a partir de broza de <i>Coffea Arabica</i> que funcione como un biofiltro.	72
5.3 Cuantificar el plomo y cadmio absorbido por la broza de “café” por medio de Espectrofotometría de Absorción Atómica.	74
5.3.1 Caracterización fitoquímica de la broza de “café”.	78
5.4 Comparar los resultados obtenidos con los que establece la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO 13.49.01:09) Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor, para los niveles de plomo y cadmio en agua.	79
5.5 Aplicar los modelos matemáticos al proceso de absorción en columna para la determinación de metales pesados en broza de “café”.	81
5.5.1 Aplicación de los modelos de biosorción en columna.	81

5.5.1.1	Aplicación de los modelos de biosorción en columna, Lectura N°1.	81
5.5.1.1.1	Aplicación del Modelo de Dosis Respuesta.	81
5.5.1.1.2	Aplicación del Modelo de Thomas.	83
5.5.1.1.3	Aplicación de la Isotherma de Langmuir.	85
5.5.1.2	Aplicación de los modelos de biosorción en columna utilizando gráficas, Lectura N°2 y N°3.	87
5.5.2	Parámetros obtenidos en los modelos de biosorción.	87
5.6	Realizar una comparación entre los métodos de extracción por Cafetera Doméstica y Aparato Soxhlet de la broza de “café” planteados en el análisis.	90
5.6.1	Análisis Estadístico ANOVA de plomo/Cafetera-plomo/Soxhlet.	91
5.6.1.1	Interpretación del Análisis Estadístico.	91
5.6.2	Análisis Estadístico ANOVA cadmio/Cafetera-cadmio/Soxhlet.	91
5.6.2.1	Interpretación del Análisis Estadístico.	91
5.7	Capacidad máxima de remoción de plomo y cadmio de la broza de “café”.	94
5.8	Porcentaje de remoción de los metales pesados cadmio y plomo.	96
CAPITULO VI		
6.0	CONCLUSIONES.	100
CAPITULO VII		
VII.	RECOMENDACIONES.	103
	BIBLIOGRAFÍA	
	GLOSARIO	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N°		Pág. N°
1	Componentes de un fotómetro de emisión de flama y de un Espectrofotómetro de absorción Atómica.	50
2	Esquema de un Espectrofotómetro de Absorción Atómica Electrotérmica	51
3	Componentes básicos de un equipo de Absorción Atómica.	51
4	Gráfica Dosis Respuesta plomo/Soxhlet, lectura 1.	80
5	Gráfica Dosis Respuesta cadmio/Soxhlet, lectura 1.	81
6	Gráfica Modelo Thomas plomo/Soxhlet, lectura 1.	82
7	Gráfica Modelo Thomas cadmio/Soxhlet, lectura 1.	83
8	Gráfica Isoterma Langmuir plomo/Soxhlet, lectura 1.	84
9	Gráfica Isoterma Langmuir cadmio/Soxhlet, lectura 1.	85
10	Esquema de Trabajo General	119
11	Museo de Historia Natural de El Salvador, Parque Saburo Hirao	131
12	Mapa geográfico de producción de café en El Salvador.	135
13	Fotografía de biosorción en columna de la broza de “café” preparada por Aparato Soxhlet.	137
14	Fotografía de biosorción en columna de la broza de “café” preparada por Cafetera Doméstica.	138

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N°		Pág. N°
1	Resultados obtenidos de la medición por Espectrofotometría de Absorción Atómica de la broza de “café” por Aparato Soxhlet.	74
2	Resultados obtenidos de la medición por Espectrofotometría de Absorción Atómica de la broza de “café” por Cafetera Doméstica.	75
3	Compuestos fitoquímicos reportados por literatura en la broza de “café”.	78
4	Parámetros de biosorción aplicando el Modelo de Dosis Respuesta.	86
5	Parámetros de biosorción aplicando el Modelo de Thomas.	87
6	Parámetros de biosorción aplicando la Isoterma de Langmuir.	87
7	ANOVA Estadístico para plomo/Cafetera-plomo/Soxhlet.	90
8	ANOVA Estadístico para cadmio/Cafetera-cadmio/Soxhlet.	90
9	Capacidades de adsorción de diferentes materiales.	91
10	Capacidad máxima de remoción de diferentes materiales.	94
11	Porcentaje de remoción de plomo y cadmio por Aparato Soxhlet.	95
12	Porcentaje de remoción de plomo y cadmio por Cafetera Doméstica.	96
13	Escala de Tamices de Tyler.	121

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO N°

- 1 Norma Salvadoreña Oficial NSO 13.49.01:09 Agua. Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor.
- 2 Esquema de trabajo general.
- 3 Escala de Tamices de Tyler.
- 4 Preparación de soluciones para pH.
- 5 Procedimiento de Lectura de plomo y Preparación de soluciones estándar de plomo.
- 6 Procedimiento de Lectura de cadmio y Preparación de soluciones estándar de cadmio.
- 7 Fotografía del Museo de Historia Natural de El Salvador, Parque Saburo Hirao.
- 8 Constancia de Identificación de la especie vegetal de *Coffea arabica*.
- 9 Mapa geográfico de producción de café en El Salvador.
- 10 Fotografías de la biosorción en columna de plomo y cadmio con broza de café.
- 11 Resultados de Espectrofotometría de Absorción Atómica para plomo y cadmio con broza de café.
- 12 Materiales, Cristalería y Reactivos.

ABREVIATURAS

Cd	Cadmio
Cu	Cobre
EEA	Espectroscopia de Absorción Atómica
EMEA	Agencia Europea para la Evaluación de Productos Medicinales
FDA	Food and Drug Administration (administración de medicamento y alimentos)
GPS	Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)
HCl	Ácido Clorhídrico
HNO₃	Ácido Nítrico
ISIC	Instituto Salvadoreño de Investigaciones del “Café”
msnm	metros sobre el nivel del mar
MT	Metalotioneínas
mm	Milímetros
mg	Miligramos
MUHNES	Museo de Historia Natural de El Salvador, Parque Saburo Hirao
NaOH	Hidróxido de Sodio
nm	Nanómetros
OMS	Organización Mundial de la Salud
ppm	partes por millón
Pb	Plomo
TCP	Túbulo Contorneado Proximal

RESUMEN

La contaminación por metales pesados es el resultado de las actividades humanas, industria y agricultura, los contaminantes son descargados al medio ambiente alcanzando concentraciones elevadas a los valores permitidos por legislaciones. El Salvador es uno de los productores de café el cual produce cantidades de residuos cafetaleros, que son fuente de contaminación ambiental, por lo cual se buscan alternativas para que sean reutilizados en diferentes áreas. En este estudio se evaluó reutilizar la broza de café luego de su preparación por Cafetera Doméstica simulando el proceso en casa con agua bidestilada y el otro por Aparato Soxhlet con hexano donde eliminamos su aceite esencial. El proceso de absorción de los metales se realizó en columnas de lecho continuo, siendo la broza de “café” el material biosorbente para la remoción de dos metales pesados más tóxicos del medio ambiente, como lo son plomo y cadmio; para lo cual se utilizó una solución combinada de sales de nitrato de estos metales pesados a un pH 6.

Las muestras líquidas finales se recolectaron y cuantificaron por EAA en el Laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas en el periodo de octubre a noviembre 2019. Los datos obtenidos por EAA se aplicaron tres modelos matemáticos para evaluar la capacidad de absorción: Dosis Respuesta, Thomas y Langmuir. La Isotherma de Langmuir fue la que mejor se adaptó a nuestro análisis experimental obteniendo un R^2 más cercano a 1 comparando los otros modelos. Se hizo un análisis estadístico ANOVA con el programa Statgraphics versión 19 donde se comparó los métodos de preparación de la broza de café, donde por Cafetera Doméstica se captó más cadmio y Aparato Soxhlet captó más plomo. Se obtuvo un porcentaje de remoción de plomo del 99.90% y cadmio del 97.20% en Aparato Soxhlet y para Cafetera Doméstica fue del 99.47% para plomo y cadmio fue del 99.71%, obteniendo resultados efectivos para la utilización de broza de café como un tratamiento alternativo para la remoción de plomo y cadmio de aguas residuales y así disminuir la contaminación tan perjudicial para la salud. Por tanto, recomendamos la utilización de broza de café para la remoción de metales pesados.

CAPITULO I
INTRODUCCION

1.0 INTRODUCCION.

En El Salvador el “café” tiene una gran importancia en la economía por su cultivo y su beneficiado, sin embargo, en los últimos años se ha encontrado en una crisis económica de la cual está en una recuperación lenta, adicionándose la falta de incentivos al sector cafetalero más la incidencia de algunos fenómenos tales como sequias y depresiones tropicales que han contribuido a realizar un mal manejo de los suelos provocando la infertilidad de los mismos.

Se plantean alternativas para aprovechar los subproductos que se generan en el procesamiento del “café” como lo son: reutilizar la pulpa de “café” como abono orgánico en fincas, utilizar la cascarilla del “café” como combustible en hornos de leña y el uso de la broza de “café” como abono orgánico, mejorador físico de suelos y como biosorbente de metales pesados en aguas de desecho.

El procesamiento del “café” es una de las actividades agroindustriales más contaminantes por el proceso de beneficiado donde se utilizan grandes cantidades de agua, que son descargadas como aguas residuales a los ríos; la contaminación de las fuentes hídricas da lugar a un incremento de los contaminantes tóxicos como son los metales pesados. A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados no son biodegradables, es decir pueden persistir y acumularse en el medio ambiente y en los organismos vivos, ejerciendo efectos adversos sobre la salud de seres vivos.

Actualmente hay procesos que se utilizan para la eliminación de los metales pesados de soluciones acuosas entre los se mencionan están la Precipitación química, Electrodiálisis, Ultrafiltración, Intercambio iónico, Absorción por medio de biomosas.

El uso de biomosas como materiales absorbibles satisface dos ámbitos importantes para la protección del medio ambiente: La neutralización de materiales de desecho y la descontaminación de aguas residuales.⁽²⁴⁾ Debido a lo anterior la presente propuesta considera la biosorción como una alternativa viable en la remoción de metales pesados (cadmio y plomo) de soluciones

acuosas mediante residuos sólidos resultantes de la preparación de la bebida de “café”.

En el periodo de octubre a diciembre de 2019 se inició la investigación bibliográfica para recopilar la información necesaria para el análisis, además realizamos una visita a la Finca El Zapote para identificar la zona geográfica y el lugar de recolección de los granos de *Coffea arabica*, Variedad Pacas de la Familia Rubiaceae. Luego se llevó una muestra al Herbario del Museo de Historia Natural de El Salvador, Parque Saburo Hirao, donde se identificó botánicamente la especie de “café” utilizado en el análisis.

La muestra recolectada de “café” se trasladó al Laboratorio de Investigación en Productos Naturales de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador, donde se procesaron las muestras y se prepararon las soluciones de metales pesados utilizadas para el análisis de las columnas de cada broza. Durante los meses de octubre a noviembre de 2019 se realizaron los análisis experimentales de las muestras dos columnas de cada broza de “café”, posteriormente se procedió a cuantificar las muestras por Absorción Atómica las cuales se realizaron en Laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, una vez obtenidos los análisis se procedió con la tabulación y discusión de resultados obtenidos en el período comprendido de febrero a mayo de 2021.

CAPITULO II

OBJETIVOS

2.0 OBJETIVOS.

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la absorción de Plomo y Cadmio en solución acuosa de flujo continuo utilizando broza de “Café” *Coffea arabica*.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 2.2.1 Identificar botánicamente la especie de *Coffea arabica* a utilizar en el estudio.
- 2.2.2 Preparar una columna de flujo continuo a partir de broza de *Coffea arabica* que funcione como un biofiltro.
- 2.2.3 Cuantificar el plomo y cadmio absorbido por la broza de “café” por medio de Espectrofotometría de Absorción Atómica.
- 2.2.4 Comparar los resultados obtenidos con los que establece la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO 13.49.01:09) Aguas Residuales descargadas a un cuerpo receptor, para los niveles de plomo y cadmio en agua.
- 2.2.5 Aplicar los modelos matemáticos al proceso de absorción en columna para la determinación de metales pesados en broza de “café”.
- 2.2.6 Realizar una comparación entre los métodos de extracción por Cafetera y Aparato Soxhlet de la broza de “café” planteados en el análisis.

CAPITULO III
MARCO TEORICO

3.0 MARCO TEORICO.

3.1 Generalidades de la familia Rubiaceae.

Se conoce que la familia de las Rubiaceae es una de las familias de las plantas con mayor diversidad, que reúne cerca de 600 géneros y más de 10,000 especies; aunque tiene su máxima expresión en los trópicos donde está representada, sobre todo por plantas leñosas. Importantes especies pertenecen a esta familia dentro de las que resaltamos por su importancia económica al “café” (*Coffea arabica*). Otras especies ornamentales son igualmente importantes como es el caso de las plantas de Ixora (*Ixora odorata*). De gran relevancia también es el árbol de china (*Cinchona succiruba*, *C. lancifolia*), cultivado en Asia tropical por los alcaloides de la corteza que se utilizan contra la malaria. Los productos útiles derivados de especies Rubiaceae incluyen también a la “quinina”, el “café” y la droga Ipecacuana; mencionados también como los más importantes de esta familia.⁽¹¹⁾

En El Salvador con la llegada de la roya se hizo más imperativo y urgente introducir y disponer de nuevos materiales genéticos que ampliaran la base genética de las variedades existentes; además que presentaran mejor producción, adaptabilidad y resistencia a enfermedades como la roya, como respuesta a estas necesidades se crearon diferentes variedades partiendo de la variedad más importante de “café” en el país la cual es el Bourbon; partiendo de esta se hicieron variaciones genéticas dando como resultado las siguientes variedades: Tekisic, Pacas, Catisic, Catuai Rojo, Pacamara, Cuzcatleco, Híbrido F-1 e Icatú.⁽⁵⁵⁾

La planta de “café” pertenece al género *Coffea* de la familia Rubiaceae con más de 70 especies, solo dos de importancia económica y comercial, la especie arábica (*Coffea arabica*) y la especie robusta (*Coffea canephora*).⁽⁵⁵⁾ Los cafetos del género *Coffea*, son de origen africano, actualmente son conocidas más de cien especies de *Coffea*, de las cuales básicamente dos son las cultivadas, *C. arabica* L y *C. canephora* P. aproximadamente el 75% de la producción mundial corresponde a *C. arabica*. La especie *C. canephora* como todas las otras especies salvajes de *Coffea* es diploide y estrictamente auto incompatibles, por

lo tanto, las descendencias de *C. canephora* provienen de fecundaciones cruzadas y manifiestan un importante polimorfismo.⁽⁵⁵⁾

El “café” se clasifica taxonómicamente de la siguiente manera según la Asociación Cafetalera de El Salvador en el 2000:⁽⁵⁾

Reino: Vegetal

División: Antofita

Clase: Dicotyledoneae

Subclase: Simpétala

Orden: Rubiales

Familia: Rubiaceae

Sección: Eucoffea

Género: *Coffea*

Especie: *arabica, canephora, liberica, excelsa*

3.2 Descripción botánica del “café”.⁽⁷³⁾

Arbusto o arbolitos de hasta 8 metros de altura, glabrescentes.

Hojas opuestas, elíptico-oblongas de 25 centímetros de largo y de 2.5 a 10 centímetros de ancho. Ápice acuminado, base aguda acuminada, papiráceas, brillantes en el haz, nervios secundarios de 7 a 10 pares; peciolo de 6 a 15 milímetros de largo; estípulas de 3 a 12 milímetros de largo.

Inflorescencias con bractéolas hasta de 2 milímetros de largo, flores subsésiles; limbo calicino de 0.5 a 1 milímetro de largo; tubo corolino de 5 a 11 milímetros de largo, lobos de 5, 9 a 20 milímetros de largo.

Frutos de 10 a 16 milímetros de largo y de 8 a 13 milímetros de ancho.

Ampliamente cultivada en zonas de bosques siempre verdes en las zonas pacíficas y norcentral, cultivada en todas las zonas húmedas tropicales. Esta especie produce las semillas preferidas para el comercio. Las plantas a veces persisten después del cultivo, pero casi nunca se escapan ni se naturalizan.

3.3 Origen y distribución del “café”. ⁽³⁹⁾⁽⁴¹⁾⁽²¹⁾

El cafeto tuvo su origen en África la especie más extendida en el mundo es la *arabica*, existiendo en estado natural, en las altas mesetas etíopes, en la región del lago de Tana. Otras especies se observaron en estado silvestre en diferentes lugares de África Tropical; la especie excelsa en Costa de Marfil, Camerún y Guinea Francesa. El *Coffea liberica* en Sierra Leona, *liberica* y Costa de Marfil.⁽²¹⁾ Menciona que este cultivo se propago en la Edad Media de Etiopía Arabia, los árabes del Yemen utilizaban las cubiertas secas de los frutos de cafeto desde la India en el siglo XV, para preparar una infusión denominada “Kisher”.⁽²¹⁾ El cafeto se introduce a la India en el siglo XVII en ese mismo siglo fue llevado Java del Yemen hasta el Jardín Botánico de Ámsterdam.⁽⁴¹⁾

Se menciona que el cafeto fue introducido en Brasil en el año 1727; cafetos procedentes de Arabia fueron llevados a Jamaica en 1730 entre 1770 a 1790 el cultivo se extendió a Cuba, Puerto Rico, Santo Domingo, México y Colombia. En Centro América se estima que el periodo de introducción fue entre 1779 a 1796. Posiblemente el “café” fue llevado de Cuba a Costa Rica por Francisco Javier Navarro en 1796. Aunque los mexicanos sostienen que fueron los primeros en sembrarlo en fincas de las cercanías de Córdoba, en época anterior a la señalada. En Guatemala se dice que el cultivo del “café” se inició en 1835, traído de Moka por los padres de la compañía de Jesús; cultivándolos en la casa de estudios de Antigua Guatemala y en Belice se inició su cultivo en 1837 procedente de Jamaica.

En El Salvador algunas fuentes sostienen que el posible periodo de introducción fue en 1800 a 1815, un siglo después de haber ingresado su cultivo a América; se argumenta que los primeros en haber conocido las plantas de “café” fueron los señores Cirilo Guerra y Francisco Martínez en 1837 o 1838 en Santa Ana, producto de semillas de “café” que habitaban en los huertos de dos indios en Ahuachapán que estos últimos habían obtenido en la Hacienda Soyote, propiedad de los señores Álvarez de Asturias en el Departamento de Jutiapa en Guatemala. Posteriormente de Ahuachapán lo trasladaron a Santa Ana; extendiéndose al resto de la República.⁽⁵⁾

3.4 Historia del “café” en El Salvador.⁽¹⁷⁾

Algunos historiadores fijan el periodo de introducción del cultivo de “café” a El Salvador entre los años 1779 y 1796. Según la historia las primeras plantas se encontraron en los terrenos de dos campesinos de Ahuachapán, quienes a su vez habían obtenido la semilla en Jutiapa Guatemala.

En 1846 se dictaron algunas medidas para favorecer la siembra del “café”, tal es el caso de un Decreto puesto en vigencia en 1846, donde se establece que todos los agricultores que se dediquen al cultivo del “café” y tengan su parcela en altitudes superiores a los 5,000 pies de altura sobre el nivel del mar, quedan exceptuados por diez años de cargos concejiles. De igual manera los operarios que se ocupen del trabajo en fincas de “café”, quedan exceptuados del servicio militar por diez años, comprobando la dedicación a dicho trabajo con certificado de algún empresario o dueño de cafetal. El “café” cosechado será libre por siete años de impuesto.

A partir de 1857 se expandió el cultivo por todo el territorio salvadoreño, la ruta se inició en Ahuachapán para luego pasar a Santa Ana y Sonsonate, posteriormente se introdujo en el oeste de San Vicente, en las montañas de Berlín y en el Volcán de Chaparrastique de San Miguel. El auge del cultivo se debió a que el estado promovió esta nueva actividad productiva, mediante la reducción de impuestos, donación de plantas y la promoción de la propiedad privada de los terrenos.

Entre los años 30 y 40 del siglo XX, la caficultura recibió un decidido apoyo fomentándose la siembra de nuevas áreas cafetaleras a través de una política crediticia favorable a los caficultores. La modernización de la caficultura se inicia en la década de 1950 y estimulada por los altos precios existentes a principios de esta, los caficultores comenzaron a sustituir la variedad arábica por bourbon, un mejor uso de fertilizantes, a manejar la sombra de cafetales en diferentes formas, a usar nuevos sistemas de poda, a iniciar practicas anti-erosivas y a elevar la población de arbustos a unos 2,000 cafetos por manzanas. Se crea el Instituto Salvadoreño de Investigación del Café (ISIC), quien hizo una enorme contribución para el incremento de la productividad y la creación de nuevas variedades de alta calidad y excelente rendimiento, que comenzaron a rendir sus frutos en la década de los años 60.

El auge del cultivo del “café” se originó utilizando la sombra de árboles que provenían de bosques húmedos primarios, a medida que se fue intensificando el cultivo, estos árboles fueron sustituidos por otras especies, principalmente por los del género *Inga* por poseer características adecuadas para el cultivo.

Resultado de los logros alcanzados en materia de productividad, a mediados de los años 70 El Salvador se convirtió en el quinto productor mundial y cuarto exportador con cosechas cercanas a los 5 millones de quintales.

Actualmente el 11% del territorio nacional está cubierto de bosque y el 7% constituido por cafetales y árboles de sombra cultivada y de montaña. Por lo antes expuesto es importante concientizar a la población sobre la importancia del “café” para el país y el consumo de este.

A partir del año 2014 se inicia la política de reactivación de la caficultura nacional, por medio de un proceso gradual de renovación del parque cafetalero y otras medidas de soporte al caficultor.

3.5 Distribución de las variedades de “café” en El Salvador.

La producción mundial del “café” está conformada de “café” Robusta que es una de las especies con sabor más fuerte y presenta tonalidades amargas por su alto contenido de cafeína por lo que su consumo se realice en forma de mezclas y un 70% de “café” Arábica el cual es profundo y penetrante su sabor y con un contenido bajo en cafeína. En El Salvador el 93% del “café” que se exporta es “café” lavado (café despulpado por método de lavado) y solo el 7% es sin lavar (verdes y pepenas). El “café” salvadoreño es del género *Coffea*.⁽⁶⁸⁾

-Variedad Bourbon: Es una planta que surge como mutación espontánea del "*Coffea arabica*", de tamaño promedio alto, coloración del brote terminal verde, sus laterales de buen vigor y entrenudos largos. La altura recomendada para el cultivo es arriba de los 1,000 metros sobre el nivel del mar, en zonas de media altura y estricta altura. El bourbon presenta una productividad promedio entre 24.40 y 55.15 quintales oro por manzana.⁽²⁸⁾

-Variedad Tekisic: Esta variedad se obtuvo en el país como producto de selecciones genéticas en plantas Bourbon “tradicional” lográndose obtener al final plantas con buenas cualidades de producción adaptabilidad, conformación

de la planta y calidad del producto.⁽⁶³⁾⁽³⁹⁾ Presenta también un buen crecimiento de ramas y formación de laterales secundarios. La altura recomendada para el cultivo es entre 800 y 1500 msnm. El Tekisic presenta una productividad promedio de 16 y 60 quintales oro por manzana. Una ventaja es su reducida bienalidad, es decir las reducciones de cosecha de un año a otro son menos evidentes. Las principales desventajas de esta variedad son la poca tolerancia al viento, sol y sequía; y una mayor susceptibilidad a la roya de cafeto. Las características del grano oro son: buen peso, tamaño grande y color ligero; calidad de la taza, moderadas cualidades de aroma y acidez.⁽⁵⁾⁽³⁹⁾

-Variedad Pacas: Se originó de una mutación del Bourbon tradicional, descubierto en 1949 en la Finca San Rafael, cantón Palo Campana (Volcán de Santa Ana) departamento de Santa Ana, propiedad de la familia Pacas. En esa época la planta llamo la atención de los caficultores por su aspecto morfológico compacto y la llamaron de varias formas: Híbrido de Arábigo con San Ramón, Cafeto del Norte y Cafeto del Viento, posteriormente se le asignó el nombre de Variedad PACAS en honor al apellido de la familia en cuya propiedad se identificó la variedad.⁽¹⁸⁾

En el año 1960 el ISIC (Instituto Salvadoreño de Investigaciones del Café) inicio el estudio del Pacas con el objetivo de observar las diferencias morfológicas con respecto a los cultivos Caturra Roja (Brasil) y Villa Sarchi (Costa Rica), concluyendo que genéticamente son similares. La variedad Pacas está distribuida en el 27% del total del país.⁽³⁹⁾

Sus principales características son: Porte bajo, con ramas laterales que forman un ángulo de 45 grados. Follaje abundante, hojas de color verde oscuro con brillo y ligeramente consistente y entrenudos cortos que le dan un aspecto compacto. Tolerancia a los problemas de sequía, viento y sol. El fruto es de color rojo, de excelente calidad de bebida. Se adapta mejor a altitudes de 500 a 1000 msnm, y tolera suelos de baja capacidad de retención de agua.⁽¹⁸⁾

Los promedios de producción varían de 24 a más de 70 quintales oro por manzana, estas producciones están relacionadas a distanciamiento, altitudes, fertilización y otros. Las principales desventajas están susceptibilidad a la roya, y otros problemas fitosanitarios.⁽³⁹⁾

Respecto a valores de captación, la acidez y cuerpo oscilan de reducido a bueno con un buen sabor. El tamaño del grano es pequeño o normal, con porcentajes de granos normales del 79%.⁽³⁹⁾

Las características del grano oro son: Buen peso, tamaño grande y color ligero.⁽⁵⁾⁽³⁹⁾ El “café” de la variedad Pacas es el más cultivado en El Salvador ya que muy resistente al viento, requiere muy poco trabajo de poda.⁽¹⁸⁾

-Variedad Catisic: Es un híbrido del cruce Caturra Rojo por Híbrido de Timor, el producto de este cruce se le conoce como Catimor, el cual fue introducido a El Salvador en 1978 a través del ISIC once líneas de Catimor fueron sometidas a continua evaluación, selección y pruebas de adaptabilidad en diferentes condiciones ecológicas de El Salvador. El nombre de variedad Catisic se originó de los vocablos CAT que son las primeras letras de la palabra Catimor e ISIC, Instituto Salvadoreño de Investigaciones del “café”. El principal atributo encontrado en esta variedad es la resistencia a la roya del cafeto.⁽¹⁸⁾

Sus principales características son: plantas de porte bajo, entrenudos cortos, bandolas cortas, hojas de color verde intenso y brotes terminales color verde, frutos color rojo, cuando maduran y resistentes a la caída por defectos de lluvia, con calidad de bebida aceptable.⁽¹⁸⁾ La altitud apropiada para la siembra de Catisic es de 600 a 1000 msnm proporcionan una productividad promedio que oscila en 18 y 50 quintales oro por manzana.⁽³⁹⁾ Los resultados de catación lo ubican como aceptable en cuanto a acidez, cuerpo y sabor. El tamaño del grano es también favorable con más del 70% sobre zaranda #17.⁽³⁹⁾ Las características del grano oro son: Grande, buen peso con un color ligero; la calidad de la taza con moderadas cualidades de aroma y acidez.⁽⁵⁾⁽³⁹⁾

-Variedad Catuai Rojo: Es un híbrido obtenido en Brasil al hacer un cruzamiento entre las variedades Caturra Amarillo y Mundo Novo. Fue introducido al país por el ISIC. La planta es de tamaño intermedio un poco más alta que la variedad Pacas. Sus laterales son largos con entrenudos cortos y tendencia a formar “Crinolinias” (Palmillas),⁽³⁹⁾ con hojas ligeramente redondeadas y brillantes, brotes y hojas color verde. Alta capacidad productiva con frutos de color rojo y/o amarillo y de excelente calidad de bebida, incrementando sus cualidades gustativas cuando es cultivada en condiciones de estricta altura.⁽¹⁸⁾ Las condiciones óptimas de altitud para su cultivo inicia 600 hasta 1200 msnm. Las características del

grano oro son: Tamaño grande, buen peso y color ligero; la calidad de la taza con aroma y acidez moderada.⁽⁵⁾⁽³⁹⁾ La productividad promedio es de 26 y 60 quintales oro por manzana.⁽²⁸⁾

-Variedad Pacamara: Es un híbrido obtenido en 1958 en El Salvador, el cual resulto del cruzamiento entre las variedades Pacas y Maragogipe Rojo, con el objetivo de producción, tamaño de grano y calidad de bebida. La planta se considera de porte alto, entrenudos de longitud intermedia, hojas encarrujadas, color verde oscuro y de mayor tamaño que la variedad Pacas. El fruto presente un notable tamaño, siendo en la actualidad la variedad comercial cultivada en el país, produce granos de mayor dimensión, también destaca por su apropiada calidad en la taza, se cataloga con cuerpo y acidez apropiada aun cultivada en condiciones de media altura. Las cosechas promedio oscilan de 18 hasta 85 quintales oro por manzana.⁽⁶³⁾ La variedad se desarrolla mejor en condiciones de media a estricta altura, con rangos en altitud de siembra de 900 a 1500 msnm, estimándose que sus cualidades mejoran al cultivarse arriba de 1000 msnm.⁽³⁹⁾ Se ha notado que la variedad Pacamara tolera favorablemente problemas de sequía y viento. Las principales desventajas de esta variedad son: susceptibilidad a la roya del “café”, necesidad de fertilizaciones con respecto al tamaño y conformación de la planta, producción, tamaño del fruto y calidad de bebida. Las características del grano oro son: textura muy compacta, pesada, buen color, ranura cerrada; calidad de la taza excelentes cualidades y aroma persistente.⁽⁵⁾⁽³⁹⁾

-Cuzcatleco: Se origina del cruce entre el híbrido de Timor y la variedad Villa Sarchi (T5296). Las características son sistema radicular fuerte y profundo, con tolerancia a nematodos, de porte intermedio y muy vigorosa, de forma cónica, bandolas largas y entrenudos cortos, follaje denso, hojas color verde intenso grandes, brotes de color verde claro y a veces bronceados, resistente a la roya y precoz para producir. El fruto es de color rojo, resistente a la caída por efectos de la lluvia, de tamaño grande y de forma alargado. El rango de altitud de siembra oscila entre los 600 a 1200 msnm, con calidad de bebida aceptable.⁽¹⁸⁾

-Híbrido F-1: Posee sistema radicular fuerte y abundante porte intermedio, bandolas largas y entrenudos cortos, follaje abundante, calidad de taza mejor o igual que Caturra y Catuai. Muy precoz para producir, con tolerancia y/o resistencia a la roya.⁽¹⁸⁾

Existen tres híbridos llamados:

- Centroamericano sugerido para altitudes de bajo
- Milenio adaptado a condiciones de media altura
- Casiopea para estricta altura⁽¹⁸⁾

-Icatú: Esta variedad se obtiene a partir de la duplicación cromosómica artificial de la especie *canephora* y luego fue cruzada con la variedad Bourbon, se le llamo originalmente “Arabusta” posteriormente este “Arabusta” se retro-cruza con la variedad Mundo Novo, dando origen al Icatú. Es una variedad que se evalúa en El Salvador promisorio en producción, adaptabilidad y calidad en taza.⁽¹⁸⁾

3.6 Propiedades del “café”.

El “café” es una de las bebidas más consumidas en el mundo y es el segundo producto con mayor comercialización después del petróleo, por lo que todos los días grandes cantidades de residuos de “café” son desechados. Estos desechos contienen una gran cantidad de compuestos bioactivos que podrían ser usados en la industria de alimentos, farmacéutica o para la generación de productos con valor agregado y al mismo tiempo ayudar a aminorar la contaminación que este puede generar.⁽³¹⁾

En los últimos años se vienen desarrollando en el mundo propuestas de productos alimenticios con características diferentes a las fisicoquímicas y sensoriales es decir alimentos fisiológicamente funcionales; por tal motivo, se ha venido investigando el “café”, su composición, propiedades y su relación con la salud.

Un grano de “café” contiene normalmente un 34% de celulosa, un 30% de azúcares, un 11% de proteínas, de un 6 a un 13% de agua, y entre un 2 y un 15% de materia grasa. Otros componentes destacables son minerales, como el potasio, calcio, magnesio y fósforo, ácidos orgánicos (Cafeilquínicos o clorogénicos) y alcaloides, como la cafeína (1 - 2.5%) y la trigonelina.⁽⁶⁸⁾

El “café” tostado presenta un contenido de aceite fijo que varía entre el 12% y 18% en peso, dependiendo de la variedad de “café” que se trate. El aceite fijo contenido en el grano de “café” tostado tiene una composición química similar a

la de muchos aceites vegetales comestibles tales como el de la semilla de algodón, soya, maíz, coco, oliva y linaza, entre otros; es líquido a temperatura ambiente y presenta una porción grande de insaponificaciones que varían del 7% al 12%.⁽⁴⁶⁾

Los granos de “café” arabica tienen casi la mitad del contenido de cafeína de Robusta y producen una bebida de mayor calidad. Tostar granos de “café” produce cierta degradación de la cafeína y puede generar un sabor potente y quemado.⁽²²⁾

La cafeína es un alcaloide perteneciente al grupo de las bases púricas que aparece no solo en el “café”, sino también en el té y el chocolate. Los “café” Robusta tienen más cafeína que los Arabica (más o menos el doble). En general la cantidad de cafeína que contiene una taza de “café” varía bastante y depende del origen del “café”, de la composición de la mezcla, del método de preparación y de lo diluido que este el “café” preparado.⁽⁶⁸⁾

Atendiendo a las propiedades de la cafeína, este compuesto es un estimulante del sistema nervioso central, que aumenta el estado de vigilia, estimula las contracciones cardiacas, promueve la vasodilatación periférica y la vasoconstricción a nivel craneal. También se encarga de estimular la musculatura esquelética, la diuresis y la secreción y motilidad gástrica. La cafeína se emplea también como coadyuvante en el tratamiento de migrañas y del sobrepeso, a la vez que está asociada a fármacos con efectos secundarios sedantes.⁽⁶⁸⁾ Estos efectos de la cafeína y sus derivados sobre la función respiratoria y cardiaca se han aprovechado para mejorar la función en pacientes con asma e insuficiencia cardiaca.⁽²²⁾ Atendiendo a los efectos fisiológicos de la bebida, el “café” parece producir un incremento ligero de la presión arterial y de los niveles de homocisteína en suero. El consumo de determinados “café” con elevadas concentraciones de diterpenos también parece conducir a un aumento de los niveles séricos de colesterol.⁽⁶⁸⁾

Los ácidos clorogénicos tal vez sean los componentes más estudiados después de la cafeína. Sus propiedades farmacológicas están ligadas a su naturaleza antioxidante. El “café” verde (son granos de café sin tostar, es una mezcla de

cerezas secas) la cual es una de las principales fuentes de ácidos clorogénicos de la dieta. Durante el proceso de tueste, los ácidos clorogénicos se transforman en lactonas y fenilindanos. La trigonelina es también un compuesto importante ya que durante la torrefacción se transforma parcialmente en niacina. Esto convierte al “café” en una fuente importante de vitamina B₃. Los glicósidos tienen importancia farmacológica porque inhiben la fosforilación oxidativa, al igual que los esteres de Kahweol y Cafestol que presentan actividad antitumoral. Las semillas de “café” se emplean principalmente para producir la bebida estimulante del mismo nombre, sin embargo, también se pueden usar como biofertilizantes, biocombustibles, biomasa y con fines medicinales.⁽⁶⁸⁾

Por las características fisicoquímicas presentes en la broza de “café” (porosidad y grupos funcionales superficiales con capacidad de intercambio iónico) y su origen como subproducto de proceso, que lo hacen un material de bajo costo, han hecho de este un material bastante atractivo para la remoción de metales contaminantes presentes en aguas residuales. Por lo cual es uso de la broza de “café” como bioadsorbente para metales pesados hace un proceso en el cual las sustancias que se encuentran en el agua se adhieran a la superficie de la biomasa como lo es la broza de “café” que es un residuo generado a partir de la preparación de la bebida de “café”, lo cual nos permite remover metales que se encuentran en aguas residuales.⁽¹³⁾

3.7 Bioremediadores.

La biorremediación es un proceso de catálisis biológica espontánea o controlado, que busca remediar o eliminar la contaminación ambiental. Es utilizada comúnmente para disminuir el contenido de químicos orgánicos de suelos, aguas superficiales, aguas residuales urbanas e industriales y lodos aceitosos de refinerías petroleras.⁽⁴⁹⁾ La biorremediación hace referencia al uso de técnicas fisicoquímicas las cuales utilizan el potencial metabólico de los microorganismos, así como también los tejidos vegetales de las plantas para remover o transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples. Con el uso de esta técnica se busca disminuir el daño y lograr trabajos de descontaminación de aguas y de suelos.⁽²⁰⁾ Las técnicas de biorremediación se enmarcan en cuatro categorías:

Tratamiento in-situ, Compostaje, Landfarming y Biorreactores. Entre los tres procesos de biorremediación más importantes podemos citar a la:

1-Fitorremediación: consiste en el uso de plantas verdes para contener, remover o neutralizar compuestos orgánicos, metales pesados o radionucleidos encontrados en la rizosfera.⁽⁴⁹⁾ La fitorremediación es una metodología dentro de la biorremediación que consiste en el uso de especies vegetales que debido a su capacidad de absorber, volatilizar, tolerar y acumular altas concentraciones de contaminantes permiten la remoción de los mismos; esta práctica se diferencia de otras ya que tiene las características de ser económica, no compleja y limpia ya que no afecta la estructura del suelo, ni utiliza reactivos químicos.⁽²⁰⁾

El desarrollo de la fitorremediación está siendo impulsado principalmente por el alto costo de muchos otros métodos de remediación del suelo, así como por el deseo de utilizar un proceso verde y sostenible.⁽⁶⁵⁾ La fitorremediación se emplea para remediar zonas afectadas tanto con contaminantes orgánicos como inorgánicos.⁽⁴⁴⁾

Este proceso puede ser optimizado de diferentes maneras, lo cual dependerá del contaminante a tratar. En el caso de metales pesados, la fitorremediación puede ser más eficiente cuando se incrementa la biodisponibilidad del metal por la adición de agentes quelantes o extractantes.⁽²⁶⁾

La fitorremediación presenta ventajas y desventajas que la hacen apropiada para trabajar bajo ciertas circunstancias. Las ventajas que presenta, disminuyen el riesgo de diseminación de contaminantes de un recurso a otro, no requiere de consumo de energía ni es perjudicial para el medio ambiente, su actuación en el suelo es beneficiosa tanto por la significativa mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas. La desventaja que presenta es que hacen que su eficiencia está limitada a factores como las especies que se empleen pues se tiene en cuenta el tipo de planta, la elongación de las raíces, la edad, entre otros.⁽²⁰⁾

2-Bioacumulación: es la adsorción de las especies metálicas mediante los mecanismos de acumulación al interior de las células de biomasa vivas. Se

considera como un proceso activo de eliminación de metales pesados mediante un mecanismo metabólico que puede involucrar masas vivas. (71)

El proceso de bioacumulación implica una primera etapa que es la bioadsorción, sin embargo, luego le siguen otras etapas las cuales permiten el transporte de los contaminantes a través de un sistema de transporte activo que permite el consumo de energía al interior de la célula.(71) Es un proceso físico-químico que incluye los fenómenos de adsorción y absorción de moléculas y iones. Este método poco convencional busca principalmente la remoción de metales pesados en aguas residuales provenientes del sector industrial, usando como sorbente diferentes materiales de origen biológico (vivo o muerto), tales como: algas, hongos, bacterias, cáscaras de frutas, productos agrícolas y algunos tipos de biopolímeros.(71)

3-Bioadsorción: es la adsorción de los iones en la superficie de la célula. El fenómeno puede ocurrir por intercambio iónico, precipitación, complejación o atracción electrostática. Este proceso es pasivo con un mecanismo netamente fisicoquímico por medio de biomasa muerta.(71) Se puede establecer que la bioadsorción se puede considerar como la mejor alternativa para la eliminación de iones metálicos presentes en aguas residuales, debido a que no usa organismos vivos como materiales biosorbentes; ya que estos pueden verse afectados por las altas concentraciones de dichos contaminantes, interrumpiendo el proceso de adsorción por la muerte de estos. Por consiguiente, al usar biomasa inerte, se puede evitar el rápido deterioro del material biosorbente, e inclusive, se puede ajustar ciertas variables para aumentar la eficiencia del proceso.(71)

En el proceso de biosorción planteado en esta investigación utilizaremos un polímero como lo es la broza de “café” ya que por su alto contenido lipídico y por su porosidad, se propone la utilización de la broza tradicional obtenida en una Cafetera Doméstica y la broza desengrasada por el Aparato Soxhlet para que facilite el contacto con las soluciones y el biosorbente, las cuales se emplearán en esta investigación para estudiar la capacidad que posee de remover iones plomo y cadmio en un solución estándar de 100 ppm de plomo y 60 ppm de cadmio partiendo de una de las sales de nitrato de plomo y nitrato de cadmio tetrahidratado, dichas concentraciones fueron tomadas de la literatura, tomando

en cuenta que el plomo a 100 ppm es más fácilmente absorbido que el cadmio a 60 ppm, por lo que se espera una menor absorción de este último metal.⁽⁴⁰⁾ A un pH bajo, la solución de metales permite una mejor adsorción del ion metálico en el adsorbente, ya que a un pH de 6 el cadmio y plomo pueden existir en forma de cationes, se eligió este pH y no uno menor debido a que a bajo pH puede ocurrir la competencia, por parte de los iones H^+ por los sitios activos en el adsorbente, mientras que a pH altos puede ocurrir la precipitación de los iones metálicos debido a la formación de hidroxilos metálicos.⁽⁴⁰⁾ Además la altura de la columna se tomó en cuenta ya que se ve involucrada la capacidad de la adsorción de la biomasa para cadmio y plomo.⁽⁴⁰⁾

3.7.1 Los metales de interés en el proceso de bioadsorción.

Los metales pesados son contaminantes de origen inorgánico que contaminan las aguas superficiales y subterráneas como consecuencia de eventos naturales y actividades humanas. Su liberación al medio ambiente presenta una seria amenaza, debido a sus efectos citotóxicos, mutagénicos y cancerígenos en los seres humanos y la vida silvestre. Se han desarrollado diferentes tecnologías, tales como precipitación química, coagulación, floculación, flotación, intercambio iónico y filtración por membrana para eliminar metales pesados de aguas residuales contaminadas. Sin embargo, tienen limitaciones inherentes debidas principalmente a la falta de viabilidad económica para el tratamiento de grandes volúmenes de agua con una baja concentración de metales. El tratamiento biológico de los metales, especialmente la fitorremediación, se está convirtiendo en una alternativa más atractiva. Es un campo emergente en el que se realiza una investigación activa en todo el mundo.⁽⁵⁷⁾ La Fitorremediación se caracteriza por ser un método económico y muestra una importante ventaja ya que reduce los costos por encima de otras tecnologías de remediación fisicoquímicas antes mencionadas. Esta se constituye como una alternativa eficaz y económica para realizar procesos de descontaminación de metales pesados usando biosólidos sin causar daño o deterioro en los suelos o aguas en los que se pueda aplicar, de tal manera ayuda a disminuir la contaminación de suelos y aguas.

3.7.2 Aplicación de los modelos matemáticos a la biosorción en columna.⁽⁷⁶⁾

Para calcular la capacidad de adsorción de una biomasa es importante calcular y describir la cinética del proceso para ello haremos uso de varios modelos matemáticos los cuales son útiles en este aspecto porque constituyen guías visuales para el diseño experimental y suministran las predicciones para la ejecución del proceso de biosorción en cuestión, bajo diferentes condiciones operativas.

Entre los modelos matemáticos más utilizados para describir el comportamiento dinámico de la eliminación de contaminantes en una columna de lecho fijo son los de Thomas, Dosis Respuesta y la Isoterma de Langmuir estos son los modelos que se aplicaran a los datos experimentales obtenidos por biosorción de plomo y cadmio por broza de “café”.

3.7.3 Modelos matemáticos del proceso de biosorción en columna.

Para calcular la capacidad de adsorción de una biomasa, es importante calcular y describir la cinética del proceso, para ello existen varios modelos matemáticos, los cuales son útiles en este aspecto, porque constituyen guías visuales para el diseño experimental y suministran las predicciones para la ejecución del proceso de biosorción en cuestión, bajo diferentes condiciones operativas. Entre los modelos matemáticos más utilizados para describir el comportamiento dinámico de la eliminación de contaminantes en una columna de lecho fijo están la Isoterma de Langmuir, los Modelos de Thomas y Dosis-Respuesta; en estos modelos se pueden aplicar a los datos experimentales obtenidos para biosorción de plomo y cadmio por broza de “café”.⁽⁷⁶⁾

3.7.3.1 Modelo de Thomas

Es uno de los más generales y utilizados para describir el comportamiento del proceso de biosorción en columnas de lecho fijo y fluido; se utiliza para conocer la máxima capacidad de adsorción de un adsorbente y obtener el rendimiento teórico de la columna y asume que hay un flujo sin dispersión axial en el techo y que la fuerza motriz obedece a la isoterma de Langmuir.⁽⁴³⁾ Este modelo se basa en una cinética de adsorción de segundo orden y considera que la adsorción no está limitada por la reacción química, sino por la transferencia de masa entre la interfaz sólido-líquido.⁽⁵²⁾

El modelo se describe mediante la siguiente ecuación:(76)

$$\frac{C}{C_o} = \frac{1}{1 + e \left(\frac{K_{th}}{Q} (q_o * m_B * C_o * V_{ef}) \right)}$$

Donde:

K_{th} : es la constante de velocidad del modelo de Thomas (mL/min mg)

q_o : es la capacidad de adsorción en el modelo de Thomas (mg/g)

m_B : es la masa del biosorbente (g)

V_{ef} : es el volumen del efluente (mL)

Q : es el caudal de alimentación (mL/min)

La forma lineal del modelo de Thomas se puede representar con la siguiente ecuación:

$$\ln \left(\frac{C_o}{C} - 1 \right) = \frac{K_{th} (q_o)(m)}{Q} - \frac{K_{th} (C_o)}{1000 (Q)} V_{ef}$$

Si se representa $\ln((C_o/C)-1)$ frente al V_{ef} para un caudal determinado, de la pendiente y el intercepto se obtienen los parámetros del modelo.(52)

3.7.3.2 Isotherma de Langmuir

Se desarrolló originariamente de la adsorción de la fase gas-sólido del carbón activo. Este modelo se basa en las interacciones adsorbente-adsorbato y no tiene en cuenta las agrupaciones moleculares ni las variaciones de energía de la interacción con el adsorbente. Para aplicar la isoterma de adsorción de Langmuir hay que tener en cuenta las siguientes hipótesis:(32)

- La adsorción del soluto está confinada en una capa monomolecular.
- La energía de adsorción es constante.
- La superficie es homogénea y la afinidad de cada lugar de interacción por las moléculas de soluto es la misma.
- No se tienen en cuenta las interacciones entre las moléculas adsorbidas.
- Las moléculas de soluto adsorbidas están localizadas, no se mueven por la superficie.(32)
- Temperatura constante.

- Adsorción localizada (sólo en las posiciones definidas de la superficie), por lo que, si una molécula adsorbida ocupa un espacio, ninguna más puede tomar dicho lugar.
- Distribución homogénea de la energía de las posiciones de adsorción.⁽⁵⁵⁾

La ecuación de la isoterma de Langmuir se expresa con la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{q_{max} (C_e)(b)}{1 + b (C_e)}$$

Donde:

q_e : es la cantidad retenida sobre el sólido en el equilibrio (mmol. g⁻¹ ó mg. g⁻¹).

q_{max} : la cantidad máxima retenida sobre el sólido (mmol. g⁻¹ ó mg. g⁻¹).

C_e : concentración del metal en el equilibrio (ppm).

b : es la constante empírica de Langmuir en el equilibrio (L.mg⁻¹ ó L. mmol⁻¹)

La forma lineal de la ecuación es la que se muestra a continuación en esta ecuación:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b (q_{max})} + \frac{1}{q_{max}} * C_e$$

La constante q_{max} en la ecuación de Langmuir se puede interpretar como la cantidad máxima de sitios activos para la adsorción, que son ocupados totalmente cuando se alcanza la concentración del equilibrio C_e .⁽⁹⁾

3.7.3.3 Modelo Dosis-Respuesta

Ha sido comúnmente utilizado en la farmacología para describir diferentes tipos de procesos actualmente está siendo empleado para describir los procesos de biosorción en columna ⁽⁴⁰⁾, el cual tiene una importancia relativa ya que describe la curva completa de ruptura con gran exactitud, además que puede minimizar los errores que resultan de usar el modelo de Thomas, especialmente a bajos o altos tiempos de remoción.

El modelo se describe mediante la ecuación siguiente:

$$\frac{C}{C_o} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{ef}}{b}\right)^\alpha}$$

Según el modelo de Thomas puede determinarse que, por lo tanto, el modelo de Dosis-Respuesta sería representado así:⁽⁵⁹⁾

$$\frac{C}{C_o} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{C_o V_{ef}}{q_o (m)}\right)^\alpha}$$

Para obtener los parámetros de operación se deben graficar la forma lineal del modelo de acuerdo a la función en la que se encuentren:

En su forma lineal, en función al volumen del efluente sería de la siguiente manera:

$$\ln\left(\frac{C}{C_o - C}\right) = \alpha * \ln V_{ef} - \alpha * \ln\left(\frac{q_o (mb)}{C_o}\right)$$

Donde:

α = es la constante del modelo de Dosis Respuesta.

q_o = es la concentración máxima del soluto en la fase solida (mg/g).

V_{ef} = es el volumen del efluente (L).

C = es la concentración final del metal (mg/L).

C_o = es la concentración inicial del metal (mg/L).

mb = es la masa del biosorbente (g).

Los valores de α y $\ln\left(\frac{q_o (mb)}{C_o}\right)$ se hallan a partir de la representación de $\ln(C/C_o - C)$ frente al volumen o al tiempo, a partir de la pendiente y de la ordenada al origen.⁽⁹⁾

Los modelos de Thomas y Dosis-Respuesta involucran las isothermas de adsorción más extensamente utilizados para la recuperación de un único componente son los correspondientes a las ecuaciones de Langmuir. Los dos modelos describen una amplia gama de equilibrios de adsorción y permiten una interpretación física sencilla de cómo se producen las interrelaciones entre una sustancia adsorbida (adsorbato) y una fase que adsorbe (adsorbente). Estos modelos de equilibrio que se establecen son válidos únicamente para las

condiciones que se modelan, los resultados no pueden ser extrapolables cuando se varían las condiciones del medio.⁽³²⁾

3.7.4 Capacidad máxima de remoción de plomo y cadmio de la broza de “café”.⁽⁶²⁾

En las muestras de agua pasadas por las columnas, se cuantificaron las concentraciones de los iones de plomo y cadmio respectivamente por Absorción Atómica, utilizando método de Llama de aire/acetileno.

Para determinar la capacidad que posee un material para la remoción de metales pesados, se utilizan los modelos de biosorción en columna, en nuestro caso, el modelo que mejor se ajustó, fue el modelo de las Isotermas de Langmuir. Debido a que la relación lineal existente entre los datos experimentales obtenidos fue el más alto.

3.8 Metales pesados.

Se llama metales a los elementos químicos situados a la izquierda y centro de la tabla del sistema periódico. Se clasifican en metales alcalinos y alcalinotérreos los elementos de los grupos IA y IIA, en metales de transición los elementos de los grupos IIIA y IVA respectivamente.⁽⁵⁴⁾ Algunos elementos intermedios como el arsénico del grupo VA se estudian habitualmente junto a los metales. En todos estos grupos se encuentran metales muy relevantes desde el punto de vista toxicológico, como el mercurio, el plomo, el cadmio, el arsénico y el cromo, entre otros.⁽⁶⁶⁾

Sus características químicas se basan en su estructura electrónica que condiciona las preferencias de enlace en que predominan el enlace metálico, que se establece entre átomos del mismo elemento, caracterizado por la formación de estructuras cristalinas en que cada átomo comparte los electrones de muchos de sus vecinos, y el enlace iónico, sobre todo entre los metales alcalinos y alcalinotérreos y los no metales.⁽⁶⁶⁾ Así, los elementos metálicos dan lugar a diferentes tipos de compuestos:

- Metales en estado elemental.
- Compuestos inorgánicos: halogenuros, hidroxilos, oxoácidos.
- Compuestos orgánicos: alquilos, acetatos, fenilos.

Los metales en forma inorgánica son los componentes fundamentales de los minerales de la corteza terrestre por lo que se cuentan entre los agentes químicos tóxicos de origen natural más antiguamente conocidos por el hombre.⁽²⁷⁾

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta y cierta toxicidad para el ser humano. El término "metal pesado" no está bien definido. A veces se emplea el criterio de densidad. Por ejemplo, metales de densidad mayor que 4,5 g/cm³, pero los valores en la bibliografía pueden ir desde 4 g/cm³ hasta 7 g/cm³. Otros criterios empleados son el número y el peso atómicos. Además, el término siempre suele estar relacionado con la toxicidad que presentan, aunque en este caso también se emplea el término "elemento tóxico" o "metal tóxico".⁽²⁷⁾

Muchos de los metales que tienen una densidad alta no son especialmente tóxicos y algunos son elementos esenciales en el ser humano, a determinadas concentraciones puedan ser tóxicos en alguna de sus formas. Sin embargo, hay una serie de elementos que pueden presentar, un serio problema al medio ambiente y es común referirse a ellos con el término genérico de "metales pesados".⁽²⁷⁾

Los metales pesados tóxicos más conocidos son el mercurio, el plomo, el cadmio y el talio. También se suele incluir un semimetal como es el arsénico y, en raras ocasiones, algún no metal como el selenio. A veces también se habla de Contaminación por metales pesados incluyendo otros elementos tóxicos más ligeros, como el berilio o el aluminio.⁽²⁷⁾

Los metales se pueden clasificar según el interés y su impacto ambiental en cuatro categorías:

-Pesados tóxicos: los metales pesados lo constituyen un grupo de aproximadamente 40 elementos, de elevado peso atómico (mayor a 44) cuya

densidad específica es superior a 5 g/cm^3 , excluyendo generalmente a los metales alcalinos.⁽⁷¹⁾

-Estratégicos: son minerales que entran en la producción del acero.

-Preciosos: son aquellos que se encuentran en estado libre en la naturaleza, es decir, no se encuentran combinados con otros elementos formando compuestos.

-Radionúclidos: es la forma inestable de un elemento que libera radiación a medida que se descompone y se vuelve más estable. Los radionúclidos se pueden presentar en la naturaleza o producir en el laboratorio. Los metales pesados y radionúclidos son los que presentan mayor interés en la comunidad científica, al ser considerados altamente tóxicos y perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana.⁽⁷¹⁾

Así como también los metales se pueden clasificar por su toxicidad en diferentes clases:

-Clase 1: los elementos As, Cd, Hg y Pb son tóxicos humanos que tienen un uso limitado o nulo en la fabricación de productos farmacéuticos. Su presencia en productos farmacéuticos proviene de materiales de uso común. Debido a su naturaleza única, estos 4 elementos requieren evaluación de riesgos, en todas las fuentes potenciales de impurezas elementales.⁽¹⁾

-Clase 2: los elementos de esta clase generalmente se consideran tóxicos humanos dependientes de la ruta, los elementos de clase 2 se dividen aún más en las sub clases 2A y 2B.

Los elementos de la clase 2 A: tienen una probabilidad relativamente alta de aparición en el medicamento y por lo tanto requieren una evaluación de riesgos en todas las fuentes potenciales de impurezas elementales y vías de administración. Los elementos de la clase 2A son: Co, Ni y V.⁽¹⁾

Los elementos de la clase 2B: tienen una probabilidad reducida de aparición en el medicamento relacionado con su baja abundancia y bajo potencial de ser. Como resultado, puede excluirse de la evaluación de riesgo a menos que se agreguen intencionalmente durante la fabricación de sustancias farmacológicas, excipientes u otros componentes del medicamento. Las impurezas elementales en la clase 2B incluyen: Ag, Au, Ir, Os, Pd, Pt, Rh, Ru, Se, Tl.⁽¹⁾

-Clase 3: los elementos de esta clase tienen toxicidades relativamente bajas por vía oral, pero pueden requerir consideración en la evaluación de riesgos para inhalación y rutas parenterales. Para las vías de administración oral a menos que estos elementos se agreguen intencionalmente no es necesario tenerlos en cuenta durante la evaluación del riesgo. Para productos parenterales y de inhalación, el potencial para la inclusión de estas impurezas elementales debe

evaluarse durante la evaluación de riesgo. Los elementos de esta clase incluyen: Ba, Cr, Cu, Li, Mo, Sb y Sn.⁽¹⁾

-Otros elementos: algunas impurezas elementales para los cuales no se han establecido debido a su baja toxicidad inherente y/o diferencias en las regulaciones regionales no se abordan. Si estas impurezas elementales están presentes o incluidas en el medicamento se abordan en otras pautas y/o regulaciones y prácticas regionales que pueden ser aplicables para elementos particulares (por ejemplo, Al se usa para la función renal comprometida; Mn y Zn para pacientes con función hepática comprometida). Algunos de los elementos considerados son: Al, B, Ca, Fe, K, Mg, Na, W, Zn.⁽¹⁾

3.8.1 Plomo.

3.8.1.1 Generalidades del plomo.

El plomo (Pb) es un metal gris azulado, brillante en la superficie, muy blando, muy maleable, posee gran densidad y punto de fusión bajo, cristaliza en octaedros y deja en el papel una mancha gris.⁽⁴³⁾

Pertenece a la familia IV A de la tabla periódica, la cual está conformada por los siguientes elementos químicos:

- Carbono.
- Silicio.
- Germanio.
- Estaño.
- Plomo.

Los miembros de esta familia IV A, el carbón es un no metal, el silicio y el germanio son metaloides; el plomo y el estaño son metales. La densidad del

plomo es de 11.85, este valor es el más alto dentro de la familia IV A, es uno de los factores, que, lo convierte en un metal denso, tóxico y acumulativo.⁽⁴³⁾

3.8.1.2 Fuentes naturales de plomo.⁽⁴²⁾

Es un elemento poco abundante en la litosfera, su mayor concentración se encuentra en el mineral denominado galena. Los depósitos de Pb por acción de la erosión, por lo que de esta manera la hidrosfera, se convierte en una fuente natural de Pb. Otra fuente de este metal es la atmosfera ya que es depositado de las expulsiones de la lava meteórica, los cuerpos que producen gran cantidad de partículas y aerosoles; todas estas cantidades de plomo se consideran como fuentes naturales.

3.8.1.3 Efectos tóxicos del plomo en el ser humano.⁽¹⁶⁾

El Pb puede entrar en el feto a través de la placenta de la madre, Debido a esto puede causar serios daños al sistema nervioso y al cerebro de los niños por nacer, los síntomas de la exposición al Pb incluyen cólicos, pigmentación de la piel y parálisis. Puede causar abortos y la disminución de la fertilidad en los hombres.

El organismo acumula este metal durante toda la vida y lo libera lentamente en dosis pequeñas, con el transcurso del tiempo puede causar una intoxicación por la carga corporal total de Pb. Los efectos biológicos del Pb son los mismos, independientemente de que entre en el organismo por inhalación o ingestión. El Pb interfiere con la función celular normal y con varios procesos fisiológicos.

-Efectos neurológicos: En niños se han descrito deficiencias neurológicas con niveles de exposición que antes no se consideraban nocivos, la toxicidad del Pb en la infancia puede tener efectos permanentes como la disminución de las habilidades de aprendizaje, perturbación en su comportamiento, agresión y comportamiento impulsivo e hipersensibilidad. Puede causar daño cerebral.

-Efectos hematológicos: El Pb perturba la biosíntesis de hemoglobina al inhibir la capacidad de los pasos enzimáticos en la vía metabólica del grupo "hemo". El Pb puede inducir dos tipos de anemia, la hemolítica y la que inducida a la que

interfiere con la Eritropoyesis. La anemia no es una manifestación inicial de la intoxicación por plomo, sino que sólo se manifiesta cuando los niveles de plomo en sangre permanecen altos durante períodos prolongados.

-Efectos endocrinos: Es probable que el Pb impida el crecimiento, maduración celular y el desarrollo de huesos y dientes. Existe una correlación inversa entre los niveles de plomo en sangre y los niveles de vitamina D. Dado que en el sistema endocrino la vitamina D es responsable en gran parte del mantenimiento de la homeóstasis de calcio intracelular y extracelular.

-Efectos renales: Un efecto de la exposición prolongada al Pb es la nefropatía, la alteración en la función de los túbulos proximales se manifiesta como aminoaciduria, glicosuria e hiperfosfaturia. Puede desarrollarse gota por hiperuricemia inducida por el Pb y una disminución de la excreción fraccional de ácido úrico previa a una disminución del aclaramiento de creatinina. La insuficiencia renal es responsable del 10% de las muertes de pacientes con gota. Hay un incremento en la presión sanguínea. Los síntomas incluyen cambios de comportamiento y desorden en la concentración. El Pb se acumula en los tejidos, el tipo más severo de envenenamiento causa encefalopatía. La toxicidad del Pb tiene lugar cuando los iones de Pb reaccionan con grupos tiol en proteínas como enzimas, y éstas se quedan activadas.

El mecanismo tóxico del Pb está dado por tres modalidades:

Compite con metales esenciales, especialmente el calcio y el zinc, en sus sitios de inserción.

-Afinidad por los grupos sulfidrilos (-SH) de las proteínas, lo que significa alteración de la forma y función de ellas.

-Alteración del transporte de iones esenciales.

-Interferencia en la alteración (inhibición y estimulación) de la enzima sintetasa del ácido delta aminolevulínico (AAL-S) y la inhibición de las enzimas de la transformación del coproporfirinógeno III en protoporfirina IX.

El envenenamiento por Pb puede ser tratado por terapia de quelación que es una técnica que consiste en la administración intravenosa de EDTA (Ácido Etileno Diamino Tetracético) y otra sustancia como la Penicilamina más complejos

polivitamínicos, poliminerales y antioxidantes en el organismo para el tratamiento de las diversas enfermedades causadas por los depósitos de calcio y la acumulación de metales pesados en las arterias.

3.8.2 Cadmio.

3.8.2.1 Generalidades del cadmio.

El cadmio (Cd) es un metal pesado blanco azulado, relativamente poco abundante. Es uno de los metales más tóxicos, brillante, dúctil, maleable y resistente a la corrosión,⁽³⁵⁾ se encuentra naturalmente en la corteza terrestre, también se encuentra regularmente en minerales junto con el cobre y el plomo.⁽⁵⁴⁾ Pertenece al grupo II B. Es insoluble en agua. Tiene valencias de 0, +1, +2 y forma casi todos sus compuestos en el estado de oxidación +2. El Cd metálico es oxidado lentamente en el aire húmedo y cuando es calentado en el aire, forma rápidamente compuestos de óxido de cadmio.⁽⁵⁴⁾ Las propiedades químicas y físicas del Cd son muy similares a las de zinc y con frecuencia coexiste con este metal en la naturaleza.⁽³⁾

3.8.2.2 Fuentes naturales de cadmio.⁽⁵⁴⁾

El Cd no se presenta comúnmente en el medio ambiente en forma elemental, sino combinado con otros elementos, como el oxígeno (óxido de cadmio), el cloro (cloruro de cadmio) y el azufre (sulfato de cadmio y sulfuro de cadmio). La mayor parte del Cd se encuentra en la naturaleza como complejos minerales de óxidos, sulfuros, carbonatos, zinc, plomo y cobre. El único mineral que contiene solo Cd como metal es la Greenockita (CdS). Es frecuente que aparezcan cantidades de óxido revistiendo el silicato de Zn (Hemimorfita) o su carbonato denominado octavita (CdCO₃). El Cd se libera al medio ambiente por el deterioro de las rocas dentro de los ríos y luego hacia los océanos. En el aire desde la actividad volcánica y los incendios forestales.

3.8.2.3 Efectos tóxicos del cadmio en el ser humano.

El Cd unido al plomo y al mercurio forman el “Big three” de los metales pesados con mayor potencial para dañar a los seres humanos y al medio ambiente. No se conoce que el Cd tenga algún efecto beneficioso, aunque las exposiciones prolongadas a este metal son extremadamente raras actualmente la ingestión de altas dosis, causa severas irritaciones en el estómago causando vómitos y diarrea y su inhalación causa graves irritaciones en los pulmones. El Cd afecta diversos órganos y tejidos como son: riñón, corazón (produciendo arterosclerosis aórtica y coronaria, incremento en colesterol y ácidos grasos), huesos, testículos, placenta, sistema nervioso central y periférico.⁽¹⁶⁾

La vida media del Cd (Cd^{+2}), es de aproximadamente de 15 a 30 años. El Cd parece tener efecto de interferencia en la absorción del hierro de los alimentos, que se manifiesta por una disminución en la concentración de la hemoglobina sin embargo son efectos reversibles.⁽⁵⁶⁾

-Efectos respiratorios: El pulmón es un órgano muy susceptible a la exposición al polvo de Cd, la inhalación crónica subaguda, puede producir bronquitis con daño progresivo alveolar, fibrosis secundaria y enfisema.⁽¹⁶⁾ Se han manifestado también casos de neumonía química con disnea, tos, expectoración, molestias torácicas y disfunción pulmonar; la exposición más alta podría causar edema pulmonar.⁽⁵⁶⁾

-Efectos renales: Uno de los indicios de la larga exposición al Cd es el daño renal, la reabsorción en los túbulos renales proximales está afectada y se manifiesta con una intensa proteinuria tubular, ya que puede resultar en una excreción de proteínas 10 veces superior a lo normal de proteínas totales.⁽⁵⁶⁾ El mecanismo de nefrotoxicidad es aquel mediado por la formación de anticuerpos a la MT (Metalotioneínas). La exposición al Cd incrementa la producción de MT en el hígado y en riñón, lo que constituye un mecanismo de defensa para limitar su toxicidad. Sin embargo, una vez que se excede la capacidad de las MT de almacenar de anti-MT, que también son tóxicos para las células TCP (Túbulo Contorneado Proximal).⁽⁴⁾

3.9 Marco legal acerca de cadmio y plomo en El Salvador. ⁽³⁴⁾

Es ampliamente aceptado que la disponibilidad y la calidad del agua son fundamentales para el alimento, la energía y la productividad; y que el manejo

integral de este recurso es central para la estrategia del desarrollo sustentable. Por otro lado, la OMS y otros organismos internacionales que velan por la salud y el medio ambiente han reiterado la interrelación existente entre agua y salud, asegurando que la disponibilidad de agua de buena calidad es una condición indispensable, que la calidad del agua condiciona la calidad de la vida. En El Salvador, desde finales de la década de los 80, se conoce mediante informes oficiales, que más del 90% de todas las fuentes de agua superficial se encuentran contaminadas por desechos orgánicos, industriales y agroquímicos. También las aguas subterráneas tienen niveles de contaminación tipificados desde “moderado” hasta “elevado”.

Los principales contaminantes provienen de los desagües de las alcantarillas (aguas domésticas), cultivos intensivos, beneficios de “café”, ingenios de azúcar, industrias químicas y textiles, rastros y cuando se curten pieles, botaderos de basura a cielo abierto. En la gran mayoría de los casos las fuentes citadas vierten las sustancias contaminantes, sin ningún tratamiento, directamente a los ríos, quebradas o cuerpos de agua. Por su impacto en la salud de la población y sus repercusiones a largo plazo en el desarrollo del país, se destacan dos tipos de contaminación. El primer tipo es la contaminación fecal que causa diarreas agudas y otras enfermedades gastrointestinales relacionadas con el tipo de agua que se ingiere. El segundo tipo es la causada por la presencia de metales pesados en particular el plomo la cual origina enfermedades crónicas que pueden afectar el desarrollo intelectual de niños y niñas.

3.9.1 Contaminación del agua por metales pesados.⁽¹⁵⁾

Las aguas procedentes de las industrias como la minería, la de recubrimientos metálicos, las fundidoras y otras más contaminan el agua con diversos metales. Por ejemplo, las sales de metales como el plomo, zinc, mercurio, plata, níquel, cadmio y arsénico son muy tóxicas para la flora y fauna terrestre y acuática. Las Normas Oficiales Mexicanas contra la contaminación ambiental (publicadas en el Diario Oficial del 18 octubre de 1993) consideran metales contaminantes del agua (en orden de importancia por su abundancia) a: Aluminio, Plata, Cadmio, Arsénico, Cobre, Hierro, Mercurio, Cobalto, Vanadio, Manganeso, Níquel, Zinc,

Magnesio, Antimonio, Cromo, Selenio, Titanio, Berilio, Estaño, Boro, Molibdeno, Tungsteno, Germanio, Bismuto, Plomo y Telurio.

Las sales solubles en agua de los metales pesados como el plomo, cadmio y mercurio son muy tóxicas y acumulables por los organismos que los absorben, los cuales a su vez son fuente de contaminación de las cadenas alimenticias al ser ingeridos por alguno de sus eslabones. Al ser ingeridos por el hombre en el agua y alimentos contaminados por los compuestos de mercurio, plomo o cadmio le provocan ceguera, amnesia, raquitismo, miastenia o hasta la muerte.

3.9.2 Valores permisibles de plomo y cadmio.⁽¹⁵⁾

Para establecer el límite máximo permisible de plomo y cadmio en aguas residuales, se utilizó la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO 13.49.01:09): Aguas Residuales descargadas a un cuerpo receptor. En la tabla N°3 de esta norma se detallan: Parámetros complementarios sobre valores permisibles para aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor de la Norma Salvadoreña Oficial se establece que el valor máximo permisible para plomo (Pb) es de 0.4 mg/L o 0.4 ppm y para cadmio (Cd) es de 0.1 mg/L o 0.1 ppm (Ver en Anexo N°1. La Norma Salvadoreña NSO 13.49.01:09).

Esta norma establece las características y valores fisicoquímicos microbiológicos y radioactivos permisibles que debe presentar el agua residual para proteger y rescatar los cuerpos receptores. Se aplica en todo el país para la descarga de aguas residuales vertidas a cuerpos de agua receptores superficiales.

Deberá observarse el cumplimiento de los valores permisibles establecidos en esta norma, de forma que no se causen efectos negativos en el cuerpo receptor, tales como: color, olor, turbidez, radioactividad, explosividad y otros.

Los estándares nacionales de calidad de agua potable se concentran en el establecimiento de límites para regular los contaminantes que presentan un alto riesgo de afectar la salud pública, al mismo tiempo que su establecimiento se basa en su factibilidad según los recursos económicos y ambientales disponibles por cada país.⁽⁷⁴⁾

3.10 Métodos para determinar metales pesados.

3.10.1 Espectrofotometría de Absorción Atómica.

3.10.1.1 Generalidades del método.⁽⁶⁷⁾

La Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA), su fundamento es la absorción de radiación de una longitud de onda determinada. Esta radiación es absorbida por átomos que tengan niveles energéticos cuya diferencia en energía corresponde en valor a la energía de los fotones incidentes. La cantidad de fotones absorbidos, está determinada por la Ley de Beer, que relaciona esta pérdida de poder radiante, con la concentración de la especie absorbente y con el espesor de la celda que contiene los átomos absorbentes.

3.10.1.2 Descripción de la técnica:⁽⁶⁷⁾

La técnica de atomización más usada es la FAAS, donde se nebuliza la muestra y luego se disemina en forma de aerosol dentro de una llama de aire de acetileno u óxido nitroso-acetileno, que es producida por un quemador para que se lleve a cabo la atomización.

El elemento contenido de la solución a analizar se encuentra en forma de molécula, la muestra se atomiza mediante un nebulizador mientras grandes gotas de agua se descargan al drenaje y solo una niebla fina se mezcla con el combustible y oxidante en la cámara de atomización. Luego es enviado a la llama donde la niebla se evapora instantáneamente y finas partículas de moléculas se producen, cuando estas partículas avanzan aún más en la llama, se disuelve en átomos por acción del calor (Ver figura N°1); estos átomos absorben cualitativamente la radiación emitida por la lámpara y la cantidad de radiación absorbida está en función de su concentración.

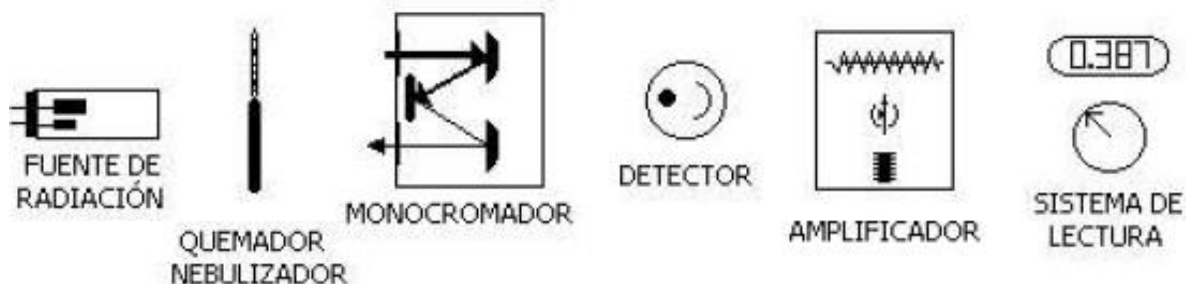


Figura N°1. Componentes de un fotómetro de emisión de flama y de un espectrofotómetro de absorción atómica.

La señal de la lámpara pasa por la llama llega a un monocromador, esta señal de radiación electromagnética llega a un detector o transductor y pasa a un amplificador y por último a un sistema de lectura.⁽⁶⁷⁾

Para lograr un análisis de sensibilidad, hay cuatro llamas estándar que se han utilizado para este método: aire acetileno, óxido de acetileno, hidrogeno-aire nitroso y argón. Estas llamas se utilizan para cada elemento dependiendo de la temperatura y características del gas.

3.10.2 La Espectrofotometría de Absorción Atómica Electrotérmica. ⁽⁶⁶⁾

La EAA electrotérmica, se basa en el mismo principio que la atomización directa en llama, con la diferencia que se emplea un atomizador calentando eléctricamente (horno de grafito) en lugar del quemador de llama.⁽⁶⁶⁾ El calentamiento de la muestra se realiza en varias etapas, a temperatura creciente: secado, calcinación, atomización y limpieza (Ver figura N°3) Tras la etapa de atomización, se obtienen átomos en estado elemental del elemento a medir. Estos átomos absorben radiación monocromática procedente de la fuente (Lámpara de Cátodo Hueco), siendo esta absorción proporcionada a la cantidad de átomos elementales (interior del tubo de grafito). Para reducir al mínimo las interferencias en la medida, se suelen añadir modificadores de matriz.

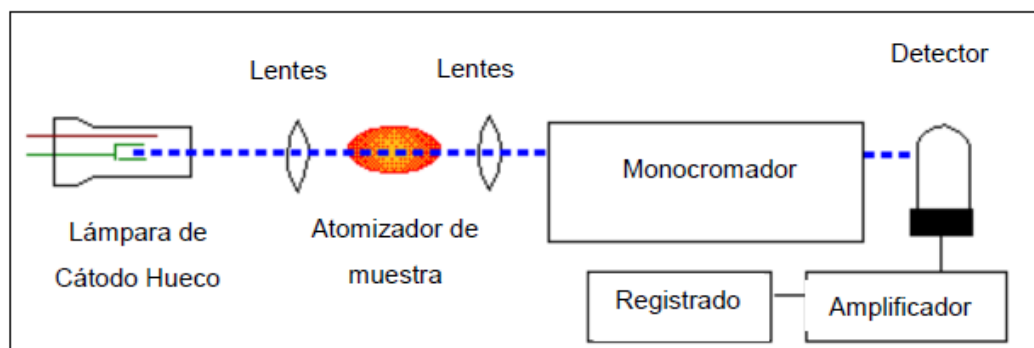


Figura N°2. Esquema de Espectrofotómetro de Absorción Atómica Electrotrémica.

Etapas del Calentamiento:

- Etapa de secado: el tubo se calienta a aproximadamente 100° C y el agua en la muestra se evapora por completo.
- Etapa de calcinación: el tubo se calienta de 400° C a 1000° C en donde la materia orgánica se disuelve y evapora.
- Etapa de atomización: se calienta de 1400° C a 3000° C y las sales metálicas que quedan en el tubo se atomizan.

3.10.2.1 Equipo de Absorción Atómica.⁽⁶⁶⁾

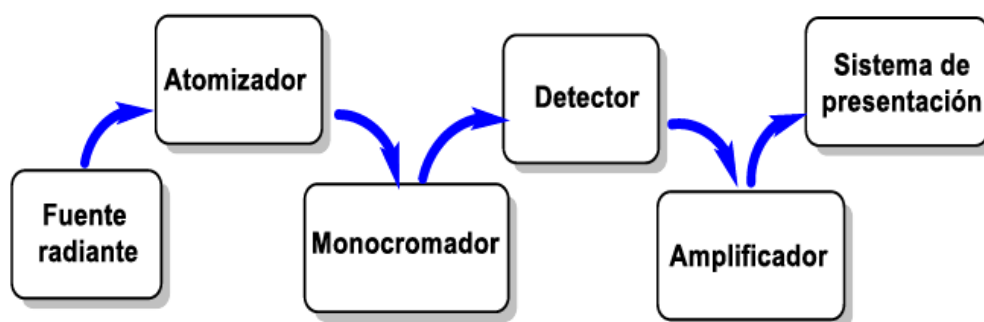


Figura N°3. Componentes básicos de un equipo de Absorción Atómica.

- a) **Fuente de Radiación:** Las fuentes de radiación empleadas en el EAA originan una banda estrecha, de intensidad adecuada y estabilidad suficiente, durante periodos de tiempo prolongados. Se utilizan las

lámparas de cátodo hueco. Estas lámparas están constituidas por un cátodo metálico que emite radiaciones de las mismas longitudes de onda que son capaces de absorber los átomos del elemento que se desea analizar.

- b) Sistema nebulizador-atomizador:** El nebulizador y el sistema atomizador suelen estar integrados en uno, en los equipos de absorción atómica. En el sistema, la disolución de la muestra (o parte de ella) es aspirada y dirigida como una fina niebla hacia la llama (atomizador), donde se forman los átomos en estado fundamental. Para obtener la llama se requiere un combustible (acetileno) y un oxidante (el aire). La óptica de un EAA es similar a la de cualquier otro espectrofotómetro (Ver figura N°3).
- c) Monocromador:** El monocromador (prisma, redes de difracción). Dispone de una rendija o ranura de entrada que limita la radiación lumínica producida por la fuente y la confina en un área determinada, un conjunto de espejos para pasar la luz a través del sistema óptico, un elemento para separar las longitudes de onda de la radiación lumínica, que puede ser un prisma o una rejilla de difracción y una rendija de salida para seleccionar la longitud de onda con la cual se desea iluminar la muestra. Parte de la radiación no absorbida es dirigida hacia el detector. (Ver figura N°3)
- d) Detector:** El sistema de detención puede estar diseñado con fotoceldas fototubos, fotodiodos o fotomultiplicadores. Esto depende de los rangos de longitud de onda, de la sensibilidad y de la velocidad de respuesta requeridas. El sistema de detención recibe la energía lumínica proveniente de la muestra y la convierte en una señal eléctrica proporcional a la energía recibida. (Ver figura N°3)
- e) Amplificador:** Es selectivo y amplifica la señal pasando luego a un dispositivo de lectura que puede ser un voltímetro digital o un registrador u otros. (Ver figura N°3)

3.10.2.2 Aplicaciones.⁽⁶⁶⁾

La EAA constituye una de las técnicas empleadas para la determinación de más de 60 elementos, algunas aplicaciones incluyen: el análisis de agua de mar, aguas residuales, agua potable, determinación de metales en sangre, especiación de metales en solución, análisis de metales pesados en alimentos

contaminados, análisis de metales en hortalizas, determinación de metales en muestras geológicas, composición de aceros, cementos, etc.

3.10.2.3 Algunas características importantes de la Espectrofotometría de Absorción Atómica.⁽⁶⁶⁾

- Aplicaciones principales: análisis cuantitativo de precisión para un metal dado.
- Fenómeno atómico: absorción de la línea atómica característica.
- Ventajas en el análisis cualitativo: análisis rápido y fiable de un elemento dado. En algunos casos alta sensibilidad Muestra promedio deseable: 100 mg
- Muestra de inyección: 50 μL , cantidad ideal es de 10 μL a 20 μL .
- Limitaciones del método: los metales se analizan individualmente no simultáneamente. Por lo general no es aplicable a no metales.
- Limitaciones para la muestra: la mayoría de muestras orgánicas líquidas y sólidas requieren de digestión antes del análisis.

3.10.3 La Espectrofotometría de Absorción Atómica con Horno de Grafito.

3.10.3.1 Generalidades del método.

El principio del método se basa en la absorción de luz por parte de un elemento en estado atómico. La longitud de onda a la cual la luz es absorbida es específica de cada elemento. Se mide la atenuación de la intensidad de la luz como resultado de la absorción, siendo la cantidad de radiación absorbida proporcional a la cantidad de átomos del elemento presente.

Es una de las formas de EAA de mayor sensibilidad (permite detectar concentraciones hasta 1000 inferiores que las detectables con llama), siendo por tanto muy útiles en el análisis de ultra-trazas. Otra gran ventaja es que se requiere muy poca cantidad de muestra (pocos microlitros, normalmente).

3.10.3.2 Descripción de la técnica.

La energía requerida para la atomización es obtenida aplicando una diferencia de potencial eléctrico a través de un tubo de grafito dentro del cual ha sido colocada la muestra. El tubo está alineado con luz procedente de la lámpara espectral. Así, el vapor atómico generado por la muestra cuando el horno está encendido, absorberá luz proveniente de la lámpara del elemento a determinar. En este caso, la señal de absorción es transitoria, en forma de pico, de tal modo que se eleva la concentración y posteriormente cae a medida que los átomos difunden fuera del horno. El método involucra fundamentalmente 2 procesos: la atomización de la muestra y la absorción de radiación proveniente de una fuente por los átomos libres. El tratamiento de la muestra hasta la atomización comprende las siguientes etapas:

-Secado. Una vez que la muestra ha sido inyectada en el tubo de grafito, se calienta a una temperatura algo inferior al punto de ebullición del solvente (usualmente entre 80 a 180 °C). El objetivo de esta etapa es la evaporación del solvente. La muestra inyectada (2-20 μL) en el horno de grafito es sometida a una temperatura algo inferior al punto de ebullición del solvente (80-180 °C). Aquí se evaporan el solvente y los componentes volátiles de la matriz.

-Calcinado. El próximo paso del programa es el calcinado por incremento de la temperatura, para remover la mayor cantidad de material (materia orgánica) de la muestra como sea posible, sin pérdida del analito. La temperatura de calcinación usada varía típicamente en el rango de 350 a 1600 °C. Durante el calcinado, el material sólido es descompuesto mientras que los materiales refractarios, como por ejemplo los óxidos, permanecen inalterados.

-Atomización. En esta etapa, el horno es calentado rápidamente a altas temperaturas (1800-2800 °C) para vaporizar los residuos del paso de calcinado. Este proceso lleva a la creación de átomos libres en el camino óptico. Se mide la absorbancia durante este paso. La temperatura de atomización depende de la volatilidad del elemento. Usualmente se agrega una cuarta etapa para limpieza del horno a una temperatura algo superior a la temperatura de atomización. Cuanto mejor sea la separación de los elementos concomitantes del analito, mejor será la atomización y la determinación estará más libre de interferencias.

CAPITULO IV
DISEÑO METODOLOGICO

4.0 DISEÑO METODOLOGICO

4.1 Tipo de Estudio.

-Retrospectivo Transversal: La toma de la muestra de la especie a estudiar broza de “café” se realizó en un tiempo anterior a la presentación de este trabajo.

-Experimental de Laboratorio Descriptivo: Se realizó la preparación de las muestras de broza de “café”, así como la preparación de la solución de metales pesados combinados utilizadas en las columnas de los bioadsorbente respectivos de cada broza de “café”, dichas muestras se prepararon en el Laboratorio de Investigación en Productos Naturales de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador. Se determino la concentración de plomo y cadmio en las aguas filtradas a través de columnas, empleando broza de café procesada por dos métodos por medio de Espectrofotometría de Absorción Atómica en el Laboratorio del Departamento de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de Universidad de El Salvador.

4.2 Investigación Bibliográfica.

En la búsqueda de información botánica se consultó las siguientes bibliotecas:

- Dr. Benjamín Orozco de Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador.
- Universidad Salvadoreña Alberto Masferrer (USAM).
- Internet.

4.3 Investigación de Campo.

-Universo: La Familia Rubiaceae

-Muestra: *Coffea arabica*, variedad Pacas perteneciente a la flora salvadoreña.

-Tamaño de muestra: 25 libras de fruto de *Coffea arabica* L, (Rubiaceae), Variedad Pacas, obtenidas de la Finca El Zapote, de las cuales posteriormente se obtuvo la broza de “café”.

Se realizó una visita de campo a la Finca El Zapote, ubicada en el Departamento de Chalatenango, Ciudad de la Palma, Cantón El Gramal Caserío Caballero en

el mes de octubre de 2019 para obtener las muestras de “café” para la preparación de las brozas. Para ser identificada la muestra se trasladó al Museo de Historia Natural de El Salvador, Parque Saburo Hirao.

4.3.1 Recolección de la muestra vegetal.⁽⁴⁵⁾

1. Recolectar las muestras representativas de la especie vegetal con los suficientes órganos vegetales para facilitar su identificación.
2. Se verifico el estado de salud de la especie vegetal, la cual se encontró libre de insectos, plagas de hongos u otros.
3. Cortar por medio de una tijera de podar una muestra de “café” de la Variedad Pacas que contenga: hojas, frutos, flores y tallos.
4. Registrar los datos de recolección como fecha, lugar, especie, variedad, altitud, ubicación geográfica, características organolépticas de la muestra.

4.3.2 Prensado de la muestra vegetal.

1. Se coloco la muestra en hojas de papel diario.
2. Presionar la muestra con dos trozos de cartón y fijarlas por medio de una soga.
3. Introducir la muestra en una bolsa hermética.
4. Una vez dentro de la bolsa, adicionar alcohol etílico al 70% y sellar la bolsa.
5. Trasladar las muestras recolectadas al Laboratorio de Investigación en Productos Naturales de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador.

4.3.3 Secado del ejemplar.

1. Retirar la muestra de la bolsa.
2. Evaporar el etanol remante al ambiente.
3. Colocar la muestra en estufa de aire circundante a 40 °C por 48 horas.
4. La muestra se transportó al Museo de Historia Natural de El Salvador, Parque Saburo Hirao para su respectiva identificación botánica.

4.3.4 Recolección, Secado y Trillado de los frutos de “café”.

1. Se recolectaron los frutos maduros de “café” de la variedad Pacas a mano en la Finca El Zapote.
2. La muestra de “café” fue despulpada y luego secada al sol.
3. La muestra seca (pergamino) se trillo, (descascarado por frotación).

4. Los granos de “café” (grano oro) se almacenaron en bolsas plásticas herméticas.
5. Se trasladaron las muestras al Laboratorio de Investigación en Productos Naturales.

4.4 Identificación botánica de la muestra de “café”.

La identificación se realizó en la sección del Herbario del Museo de Historia Natural de El Salvador, Parque Saburo Hirao con la ayuda de la Curadora, la Licda. Jenny Menjívar utilizando la información botánica de bases de datos internacionales y técnicas botánicas de identificación.

4.5 Parte Experimental.

Se realizó la recolección de los granos de “café” *Coffea arabica* de la Variedad Pacas en la Finca El Zapote, posterior a su recolección se despulparon los granos y luego secados al sol. Los granos ya secos fueron trillados (descascarado por frotación) dejando el grano en “grano oro”. Luego fue sometido a un tostado Francés a una temperatura de 200°-250°C, para después ser molido en un molino de “café” en modo turco para obtener un tamaño de partícula de 1.41 mm, una vez obtenido los granos molidos fueron extraídos por 2 métodos diferentes de extracción: por Cafetera Doméstica y por Aparato Soxhlet, para obtener las brozas de “café” para después preparar las columnas respectivas de biosorción. (Ver en Anexo N°2, la Figura N°10 del Esquema de Trabajo General).

4.5.1 Tostado y Molido de los granos de “café”.

1. Esparcir los granos de “café” en bandejas de acero inoxidable.
2. Introducir las bandejas en una estufa de aire circundante a temperatura de 200°- 250°C por 18 a 20 minutos (tostado francés)
3. Remover las muestras en intervalos de 3 minutos para obtener un tostado parejo en los granos de “café”.
4. Dejar enfriar al ambiente por 30 minutos el “café” tostado.
5. Se introdujo el “café” tostado en un molino de café hasta obtener un tamaño de partícula de 1.41 mm (Tamiz mesh 14). (Ver en Anexo N°3 la Tabla N°13 Escala de Tamices Estándar Tyler).

4.5.2 Preparación de la broza de “café”.

4.5.2.1 Preparación de la broza de “café” por Cafetera Doméstica.

1. Pesar 100 g de muestra de “café”
2. Colocar los 100 g de muestra de “café” en una Cafetera Doméstica.
3. Agregar 600 mL de agua bidestilada (el proceso se repetirá dos veces).
4. Agregar el agua bidestilada a la cafetera y ponerla a funcionar durante 20 minutos. (el proceso se repite 2 veces).
5. Extender la broza de “café” en una bandeja plana y llevar a sequedad por medio de una estufa de aire circulante.

4.5.2.2 Preparación de la broza de “café” por Aparato Soxhlet.

1. Pesar 100 g de muestra de “café” molido.
2. Preparar un dedal de papel filtro, colocar dentro del dedal 100 g de muestra de “café” molido.
3. Colocar el dedal en el cuerpo extractor del Soxhlet.
4. Extraer en Soxhlet con 700 mL de hexano por 6 horas. Repetir este procedimiento con solvente fresco, hasta agotar la muestra.
5. Una vez terminada la extracción eliminar el solvente remanente en la broza de “café”.
6. Extender la broza de “café” en una bandeja plana y llevar a sequedad por medio de una estufa de aire circulante.

4.5.3 Preparación de la solución estándar de 100 ppm de plomo y 60 ppm de cadmio a partir de las sales de nitrato de cadmio tetrahidratado y nitrato de plomo.

1. Pesar 0.7992 g de nitrato de plomo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) en un beaker de 100 mL (Beaker “A”).
2. Agregar 25 mL de agua bidestilada y agitar hasta disolver.
3. Transferir el contenido del beaker “A” a un balón volumétrico de 5 L (Balón volumétrico “C”).
4. Realizar tres lavados de 25 mL de agua bidestilada al beaker “A” y recibirlos en el balón volumétrico “C”.
5. Agitar el balón “C” para homogenizar.
6. Pesar 0.8232g de nitrato de cadmio tetrahidratado ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$) en un beaker de 100 mL (Beaker “B”).
7. Agregar 25 mL de agua bidestilada y agitar hasta disolver.

8. Transferir el contenido del beaker "B" al balón volumétrico "C".
9. Realizar tres lavados de 25 mL con agua bidestilada al beaker "B" y recibirlos en el balón volumétrico "C".
10. Agitar el balón volumétrico "C" para homogenizar.
11. Aforar el balón con agua bidestilada por medio de una pizeta y agitar nuevamente para homogenizar la solución.

4.5.4 Determinación de pH.

4.5.4.1 Calibración de pH de la solución estándar de 100 ppm de plomo y 60 ppm de cadmio a partir de las sales de nitrato de cadmio tetrahidratado y nitrato de plomo a pH 6.

1. Calibrar el pH metro con solución tampón de pH 4 a 25°C.
2. Calibrar el pH metro con solución tampón de pH 7 a 25°C.
3. Calibrar el pH metro con solución tampón de pH 10 a 25°C.
4. Tomar la lectura de la solución estándar de 60 ppm de cadmio y 100 ppm de plomo, preparada a partir las sales de nitrato de cadmio tetrahidratado y nitrato de plomo.
5. Ajustar la solución estándar de 60 ppm de cadmio y 100 ppm de plomo con NaOH 1M o HNO₃ al 10% hasta obtener un pH 6. (Ver en Anexo N°4 Preparación de reactivos para pH).

4.5.5 Preparación de la columna del biosorbente.

Se realizó el experimento con dos columnas (utilizando por separado la broza de "café" preparada por Soxhlet y Cafetera) para la biosorción de metales pesados, cuyas dimensiones son 3.2 cm de diámetro interno y 49 cm de altura.

La preparación de la columna se llevó a cabo como se describe a continuación:

1. Introducir por separado dentro de la columna, 40.0 g de broza de "café" previamente tratada en el Aparato Soxhlet o en la Cafetera Doméstica según corresponda.
2. La operación del sistema se realizó con flujo descendente donde la columna se alimentó con la solución estándar de 100 ppm de plomo y 60 ppm de cadmio preparada a partir de las sales de nitrato de cadmio tetrahidratado y nitrato de plomo.

3. Se regulo el flujo de la columna a 6 mL/minuto, la recolección de las muestras se realizó en botellas de propileno previamente lavadas y ambientadas con agua bidestilada, las muestras de soluciones, cada 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 y 270 minutos.
4. Realizar las lecturas para la determinación de cadmio y plomo por Espectrofotometría de Absorción Atómica a una longitud de onda de 228.94 y 283.3 nm para cadmio y plomo, respectivamente.

4.6 Metodología para determinar metales pesados por medio de Espectrometría de Absorción Atómica.

4.6.1 Determinación de plomo por Espectrofotometría de Absorción Atómica. ⁽³⁰⁾

Las muestras de agua digeridas (extraídas de las columnas de biosorción) se midieron directamente en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica AA-7000 marca Shimadzu utilizando viales plásticos. Los resultados obtenidos están expresados en mg/L (ppm).

4.6.1.1 Fundamento teórico.

La muestra es atomizada mediante un nebulizador y posteriormente se quema en una llama de aire-acetileno. Se hace pasar un haz de luz utilizando una lámpara de cátodo hueco para plomo que proporciona una longitud de onda de 283.3 nm, donde inducimos la absorción y translocación del metal hacia la parte aérea, donde son acumulados hasta alcanzar niveles máximos. La cantidad de energía absorbida por la muestra está relacionada directamente con la concentración de plomo en la misma.

4.6.1.2 Tratamiento de la muestra (Digestión con Ácido Clorhídrico). ⁽³⁰⁾

Cuando la muestra presenta una cantidad de sustancia orgánica muy pequeña o en suspensión, se adicionan 5 mL de ácido clorhídrico por cada 100 mL de muestra, se calienta y se ebulle durante 10 minutos.

4.6.1.3 Medición de las muestras de plomo.⁽³⁰⁾

1. Encender el equipo e introducir los parámetros necesarios para la determinación de plomo (Ver en Anexo N°5 Procedimiento de Lectura y Preparación de soluciones estándar de plomo).
 - Longitud de onda: 283.3 nm
 - Estándares a utilizar: 0.2, 0.5, 3.0, 5.0 ppm de Pb. (Ver en Anexo N°5 Procedimiento de Lectura y Preparación de soluciones estándar de plomo)
 - Corriente de lámpara: 12 mA
 - Ancho de rejilla: 0.2 nm
 - Número de repeticiones por cada lectura.
2. Dejar que el equipo se estabilice durante 15 minutos.
3. El aparato aspirará el blanco preparado, que se utilizó para corregir cualquier interferencia producida por algún reactivo.
4. El aparato aspirará los estándares en el equipo para realizar la curva de calibración.
5. Aspirar la muestra.
6. Anotar la lectura de la muestra obtenida directamente del equipo; si se realizó alguna dilución de la muestra multiplicar por el factor de dilución para obtener el resultado.
7. Corregir el resultado con el blanco si es necesario.
8. Aspirar agua destilada para limpiar el equipo y apagar.
9. El resultado estará expresado en mg/L de plomo.

4.6.2 Determinación de cadmio por Espectrometría de Absorción Atómica.⁽³⁰⁾

Las muestras de agua digeridas (extraídas de las columnas de biosorción) se midieron directamente en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica AA-7000 marca Shimadzu utilizando viales plásticos. Los resultados obtenidos están expresados en mg/L (ppm).

4.6.2.1 Fundamento teórico.

La muestra es atomizada mediante un nebulizador y posteriormente se quema en una llama de aire-acetileno. Se hace pasar un haz de luz utilizando una lámpara de cátodo hueco para cadmio que proporciona una longitud de onda de 228.94 nm, donde inducimos la absorción y translocación del metal hacia la parte aérea, donde son acumulados hasta alcanzar niveles máximos. La cantidad de energía absorbida por la muestra está relacionada directamente con la concentración de cadmio en la misma.

4.6.2.2 Tratamiento de la muestra (Digestión con Ácido Clorhídrico).⁽³⁰⁾

Cuando la muestra presenta una cantidad de sustancia orgánica muy pequeña o en suspensión, se adicionan 5 mL de ácido clorhídrico por cada 100 mL de muestra, se calienta y se ebulle durante 10 minutos.

4.6.2.3 Medición de las muestras de cadmio.⁽³⁰⁾

1. Encender el equipo e introducir los parámetros necesarios para la determinación de cadmio (Ver en Anexo N°6 Procedimiento de Lectura y Preparación de soluciones estándar de cadmio).
 - Longitud de onda: 228.94 nm
 - Estándares a utilizar: 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 ppm de Cd. (Ver en Anexo N°6 Procedimiento de Lectura y Preparación de soluciones estándar de cadmio).
 - Corriente de lámpara: 12 mA
 - Ancho de rejilla: 0.2 nm
 - Número de repeticiones por cada lectura.
2. Dejar que el equipo se estabilice durante 15 minutos.
3. El aparato aspirará el blanco preparado, que se utilizó para corregir cualquier interferencia producida por algún reactivo.
4. El aparato aspirará los estándares en el equipo para realizar la curva de calibración.
5. Aspirar la muestra.
6. Anotar la lectura de la muestra obtenida directamente del equipo; si se realizó alguna dilución de la muestra multiplicar por el factor de dilución para obtener el resultado.

7. Corregir el resultado con el blanco si es necesario.
8. Aspirar agua destilada para limpiar el equipo y apagar.
9. El resultado estará expresado en mg/L de cadmio.

4.7 Análisis Estadísticos.

Los resultados obtenidos de ambas columnas se compararon entre sí, para determinar cuál preparación de la broza fue más efectiva al remover los metales pesados. Esto se realizará por medio de un análisis estadístico de ANOVA simple con un análisis de varianza multi rangos con verificación de medias (ANOVA) en el programa Statgraphics Centurión versión 19.

En el análisis de varianza de ANOVA, se evalúa la dispersión entre los resultados, la diferencia entre los datos se determinó con la prueba F, en la que, si el valor de P es menor que 0.05, significa que hay diferencia estadísticamente significativa entre cada método de extracción obtenido por la broza de “café” con un 95% de confianza.

Se establece como Hipótesis nula (H_0) que la $Q_{Cafetera}$ sea igual a la $Q_{Soxhlet}$, y como Hipótesis alternativa (H_a) que la $Q_{Cafetera}$ sea diferente a la $Q_{Soxhlet}$; es decir que cuando el valor P sea menor a 0.05 se rechazara la Hipótesis nula (H_0) y se aceptara la Hipótesis alternativa (H_a). Y si el valor de P es menor o igual a 0.05 significa que existe una diferencia estadística significativa entre cada uno de los métodos de preparación de broza utilizados. Todo esto basándonos en la comparación de las medias obtenidas de la Q_{max} en el estudio.

Finalmente se realizó un análisis estadístico descriptivo con el fin de comparar los niveles de metales pesados en las matrices analizadas, es decir el agua resultante luego del paso por la columna de biosorbente contra las concentraciones de referencia según normativa nacional.

4.7.1 Aplicación de los modelos matemáticos a la bioadsorción en columna.⁽⁷⁶⁾

Para calcular la capacidad de adsorción de una biomasa es importante calcular y describir la cinética del proceso para ello haremos uso de varios modelos matemáticos los cuales son útiles en este aspecto porque constituyen guías visuales para el diseño experimental y suministran las predicciones para la ejecución del proceso de biosorción en cuestión, bajo diferentes condiciones operativas.

Entre los modelos matemáticos más utilizados para describir el comportamiento dinámico de la eliminación de contaminantes en una columna de lecho fijo son los de Thomas, Dosis Respuesta y Langmuir, estos son los modelos que se aplicaran a los datos experimentales obtenidos por biosorción de plomo y cadmio por broza de “café”.

4.7.1.1 Modelo Dosis Respuesta: Para obtener los parámetros de operación se deben graficar con la forma lineal de este modelo.

$$\ln\left(\frac{c}{c_0-c}\right) = \alpha * \ln V_{ef} - \alpha * \ln\left(\frac{q_0(m_b)}{c_0}\right) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

α = es la constante del modelo de Dosis Respuesta.

q_0 = es la concentración máxima del soluto en la fase solida (mg/g).

V_{ef} = es el volumen del efluente (L).

C = es la concentración final del metal (mg/L).

C_0 = es la concentración inicial del metal (mg/L).

m_b = es la masa del biosorbente (g).

Los valores de α se hallan a partir de la representación de $\ln(C/C_0-C)$ frente al volumen o al tiempo, a partir de la pendiente y de la ordenada al origen.⁽⁹⁾

4.7.1.2 Modelo de Thomas: Este modelo se describirá usando la siguiente ecuación lineal:

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{K_{th}(q_0)(m)}{Q} - \frac{K_{th}(C_0)}{1000(Q)} V_{ef} \quad (\text{Ec. 2})$$

Si se representa $\ln((C_0/C)-1)$ frente al V_{ef} para un caudal determinado, de la pendiente y el intercepto se obtienen los parámetros del modelo.⁽⁵⁹⁾

Donde:

K_{th} : es la constante de velocidad del modelo de Thomas (mL/min. mg)

q_0 : es la capacidad de adsorción en el modelo de Thomas (mg/g)

m : es la masa del biosorbente (g)

V_{ef} : es el volumen del efluente (L)

Q : es el caudal de alimentación (mL/min)

Si se representa $\ln((C_0/C)-1)$ frente al V_{ef} para un caudal determinado, de la pendiente y el intercepto se obtienen los parámetros del modelo.⁽⁵⁹⁾

4.7.1.3 Isoterma de Langmuir: La ecuación lineal de la isoterma de Langmuir se expresa de la siguiente manera:⁽⁵²⁾

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b(q_{max})} + \frac{1}{q_{max}} * C \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

q_e : es la cantidad retenida sobre el sólido en el equilibrio (mmol. g⁻¹ ó mg. g⁻¹).

q_{max} : la cantidad máxima retenida sobre el sólido (mmol. g⁻¹ ó mg. g⁻¹).

C_e : concentración del metal en el equilibrio (ppm).

b : es la constante empírica de Langmuir en el equilibrio (L.mg⁻¹ ó L. mmol⁻¹)

4.7.2 Capacidad máxima de remoción de plomo y cadmio de la broza de “café”. ⁽⁶²⁾

En las muestras de agua que se pasaron por las columnas, se cuantifico las concentraciones de los iones de plomo y cadmio respectivamente por Absorción Atómica utilizando método de Llama de aire/acetileno.

Se determino la capacidad que posee un material para la remoción de metales pesados, se utilizaron los modelos de biosorción en columna, por medio de los cálculos y de la relación lineal que arrojen los gráficos de los modelos propuestos, se utilizara el más alto para determinar dicha capacidad, además se utilizaron la q_{max} o q_0 para determinar dicha capacidad de remoción de los metales con la broza de “café”.

4.7.3 Porcentaje de remoción de los metales pesados cadmio y plomo.⁽³⁰⁾

Para calcular los porcentajes de remoción de plomo y cadmio se utilizarán las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ Remoción de Cd} = \frac{\text{Concentración Inicial (Cd)} - \text{Concentración final (Cd)}}{\text{Concentración Inicial de Cd (60ppm)}} \times 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\% \text{ Remoción de Pb} = \frac{\text{Concentración Inicial (Pb)} - \text{Concentración final (Pb)}}{\text{Concentración Inicial de Pb (100ppm)}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5})$$

La concentración inicial se determinó partiendo de un blanco de las muestras preparadas de plomo y cadmio el cual se llevó a analizar por EAA antes del proceso de biosorción en columna, así se determinó la concentración real de cadmio y plomo en la solución; y la concentración final corresponde a la reportada por EAA después del tratamiento de remoción con broza de “café”.

CAPITULO V

RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS

5.0 RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS ESTUDIO.

5.1 Identificar botánicamente la especie de *Coffea Arabica* a utilizar en el estudio.

Se llevo a cabo la recolección de la especie vegetal de “café” conformada por los siguientes órganos: hojas, frutos, flores y tallos de *Coffea arabica* de la Variedad Pacas. El sitio de la recolección fue en la Finca El Zapote, La Palma Chalatenango. Verificamos el estado de todos los órganos recolectados y procedimos al procesamiento de la muestra para realizar los análisis correspondientes.

Para la identificación botánica se realizó la selección del material vegetal recolectado evitando la recolección de partes del vegetal afectadas por enfermedades, parásitos y también por materiales extraños debido a que pudieran causar un falso positivo en las determinaciones. A demás, se registró el lugar y la fecha de recolección, además de todos aquellos datos necesarios para su identificación y localización.

El ejemplar de la especie vegetal fue llevado al Herbario del Museo de Historia Natural de El Salvador, Parque Saburo Hirao (Ver en Anexo N°7, la Figura N°11 Fotografía del Museo de Historia Natural, Parque Saburo Hirao), la cual es una institución de carácter científica que administra y maneja colecciones nacionales, las cuales se resguardan en muestras, ejemplares y piezas que se convierten en registro de patrimonio natural salvadoreño.⁽²⁹⁾

Donde la curadora, Licda. Jenny Menjívar nos constató que la muestra proporcionada corresponde a *Coffea arabica* L. de la Familia Rubiaceae. Por lo cual se proporcionó una constancia de identificación (Ver en Anexo N°8 Constancia de identificación), donde obtuvimos los siguientes datos:

- Nombre común: “café”
- Nombre científico: *Coffea arabica*
- Fecha de recolecta: 11 de mayo de 2021
- Lugar de recolecta: Finca El Zapote, La Palma Chalatenango.
- Personas que recolectaron: Lic. Ulises Castillo y Br. Carmen Contreras.

- Coordenadas de ubicación: Latitud 14° 18' 33" N; Longitud 89° 15' 45" O; 11340 msnm.
- Nombre del botánico responsable: Licda. Jenny Menjívar
- Número de voucher: J. Menjívar y K Contreras 5206

Con la información recopilada en el Herbario Nacional MUHNES y la base de datos de Trópicos® (Missouri Botanical Garden) y otras fuentes bibliográficas consultadas se recolectó la siguiente información:⁽⁷³⁾⁽²⁹⁾

Arbustos o arbolitos de hasta 8 m de altura; Inflorescencias con corolas de 5 lóbulos ovales y obtusos.⁽⁷³⁾⁽²⁹⁾ Flores subsésiles blancas al exterior y en el interior vellosa. Frutos en drupas son redondos que al principio son color verde y en la medida que van madurando se convierten en rojo, en el interior de cada fruto hay dos semillas separadas por un surco, estos son los granos del "café", los cuales se encuentran protegidos por una película plateada y recubierta por una piel de color amarillo.⁽²⁹⁾ Sus ramas poseen una característica poco común ya que poseen dos tipos de crecimiento en sus ejes, su porte fluctúa entre 1.0 m a 5.0 m y las hojas crecen en un mismo plano y en posición opuesta, las hojas de la especie *arabica* son de forma oval, acuminada, cortas y agudas en su base.⁽²⁹⁾

De acuerdo a la información recopilada en el museo, se afirma que la muestra recolectada es perteneciente a la especie vegetal de *Coffea arabica* L. perteneciente a la Familia Rubiaceae.⁽²³⁾

La Finca El Zapote, no cuenta con certificaciones extendidas por las entidades pertinentes, pero en ellas se realizan prácticas agrícolas orgánicas, en la que no se utilizan pesticidas sintéticos u otro agroquímico. Además, se encuentra alejada de fuentes antropogénicas de contaminación de metales pesados.

En El Salvador el "café" se distribuye principalmente en las 6 zonas cafetaleras las cuales se encuentran localizadas en 6 territorios: Las Cordilleras de Apaneca-Illamatepec, Quezaltepec-El Bálsamo, Chichontepec, Tecapa-Chinameca, Cacahuatique y la de Alotepec-Metapán.⁽¹⁹⁾ (Ver en Anexo N°9, Figura N°12 el

Mapa geográfico de producción de café). La Finca el Zapote es perteneciente a la Cordillera Alotepec-Metapán.

La época de siembra del “café” se realiza generalmente con plantas de vivero de un año, entre los meses de mayo y julio. La época de recolección es entre los meses de octubre de un año y marzo del siguiente año. El resto del año se realiza diversas actividades vinculadas al manejo de las fincas, tales como podas de cafeto y sombra, fertilización, control de plagas, entre otros.⁽¹⁹⁾

5.2 Preparar una columna de flujo continuo a partir de broza de *Coffea Arabica* que funcione como un biofiltro.

A la muestra recolectada de frutos maduros de *Coffea arabica* se les dio el tratamiento de despulpado por parte de los trabajadores de la Finca El Zapote y luego fue secado al sol. Una vez secos los granos, fueron trillados por frotación para luego someterlos a un Tostado Frances donde se obtuvo un grano muy oscuro y brillante, con un aroma muy intenso y de sabor ahumado, con este tipo de tueste se da un proceso de degradación de los lípidos que contienen los granos de “café”.⁽³³⁾

Procedimos a la molienda de los granos, logrando mejorar la adsorción de la solución de los metales pesados al aumentar la superficie de contacto, además se minimizó el tamaño de los granos de “café”, logrando así la extracción o la retención de plomo y cadmio en los granos molidos finos.⁽³³⁾

Una vez preparado el “café” molido, se realizaron dos pesadas diferentes de 100 g cada uno para los 2 métodos de preparación de la broza planteados en el análisis; para el método de extracción por Cafetera Doméstica se utilizó agua bidestilada siendo este un método casero y tradicional, donde se trata de aminorar o de reutilizar los desperdicios que se producen en casa o en la industria hotelera o alimenticia, para así descentralizar un poco la contaminación que produce el “café” en el ambiente aprovechando estos desperdicios en la descontaminación de aguas. Para el método de extracción por Aparato Soxhlet se logra desengrasar los granos ya molidos con un solvente orgánico (n-hexano) para así mejorar la superficie de contacto de la solución de los metales pesados con la broza, ya que en algunas ocasiones los lípidos presentes en los granos

impiden el contacto con la solución acuosa y material poroso de la broza de “café”.

Se prepararon 2 columnas por separado teniendo las siguientes especificaciones de 3.2 cm de diámetro interno y 49 cm de altura, a cada uno se les introdujo por separado 40 g de broza de “café” antes preparada, se conoce por bibliografía que existe una buena adsorción de metales pesados (cadmio y plomo) a esta cantidad de material utilizada.⁽⁵⁰⁾ La altura de la broza en las columnas juega un papel muy importante ya que la columna de Aparato Soxhlet alcanzó una altura de 10.5 cm y para Cafetera Doméstica fue de 9.5 cm, se constató la mayor adsorción de metales.⁽²⁷⁾⁽⁵⁾ (Ver en Anexo N°10, las Figuras N°13 y 14 Fotografías de las Columnas de Biosorción de plomo y cadmio).

Las columnas fueron alimentadas con la solución estándar de 100 ppm de plomo y 60 ppm de cadmio a un pH 6, las dos concentraciones fueron utilizadas en investigaciones realizadas anteriormente donde la cantidad de metales pesados no debe ser tan baja porque quedaría retenido todo el metal pesado y no se conocería el tiempo de ruptura, y no debe ser tan alta puesto que saturaría inmediatamente el material de relleno de las respectivas columnas.

De acuerdo a la literatura consultada, se evidencia que la presencia de dos o más metales pesados en una solución puede causar un efecto sinérgico es decir el plomo puede ser fácilmente adsorbido en una mayor cantidad a diferencia del cadmio, la utilización de una concentración de 100 ppm de plomo y 60 ppm de cadmio, genera que el efecto coadyuvante, en este caso el cadmio juega este papel en la solución, para que la adsorción de plomo sea mayor en comparación a la de cadmio cuando estos dos metales se encuentran en conjunto en una misma solución.⁽¹⁰⁾

La solución de 100 ppm de plomo y 60 ppm de cadmio fue ajustada a un pH 6 para que pudiesen adsorberse el plomo y cadmio en los sitios activos de la broza de “café”. Este pH permite una favorable adsorción del ion metálico en el adsorbente, ya que a un pH más bajo puede ocurrir una competencia por parte de los iones H^+ de los sitios activos en el adsorbente, mientras que a un pH alto

(arriba de 6) puede ocurrir la precipitación de los iones metálicos debido a la formación de hidroxilos metálicos, modificando la capacidad de adsorción de la broza de “café”.(40)

La solución de 100 ppm de plomo y 60 ppm de cadmio se ajustó su velocidad de flujo a 6 mL/min para no saturar el paso de la solución en la columna y así evitar un proceso brusco; la recolección de las muestras se realizó en envases de propileno previamente ambientadas con agua bidestilada cada 30 minutos terminando el proceso de biosorción en el minuto 270 de cada una de las columnas por separado.

Se cuantificaron las muestras obtenidas en las columnas de Aparato Soxhlet y Cafetera Doméstica en Espectrofotometría de Absorción Atómica a una longitud de onda de 283.3 nm y 228.94 nm para plomo y cadmio respectivamente. Estos análisis fueron realizados en el Laboratorio de Química Agrícola, del Departamento de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador.

5.3 Cuantificar el plomo y cadmio absorbido por la broza de “café” por medio de Espectrofotometría de Absorción Atómica.

Las lecturas de las muestras líquidas obtenidas de las columnas preparadas con la broza de *Coffea arabica* de la preparación por Aparato Soxhlet y Cafetera Doméstica donde fueron cuantificados plomo y cadmio, las cuales fueron realizadas por Espectrofotometría de Absorción Atómica. (Ver en Anexo N°11. Resultados de laboratorio obtenidos en EAA para los dos métodos de preparación).

Haciendo alusión al procedimiento descrito en las secciones 4.6.1.3 y 4.6.2.3 de las lecturas de metales pesados (plomo y cadmio) por EAA se obtuvieron los siguientes datos, expresados en las siguientes tablas:

Tabla N°1. Resultados obtenidos de la medición por Espectrofotometría de Absorción Atómica de la broza de “café” por Aparato Soxhlet

Tiempo(minutos)	Medición	Plomo(ppm)	Límite de la NSO (ppm)	Cadmio(ppm)	Límite de la NSO (ppm)
30 minutos	Lectura 1	3.4644	0.4	8.3420	0.1
	Lectura 2	3.4449	0.4	8.5960	0.1
	Lectura 3	3.4840	0.4	8.4710	0.1
60 minutos	Lectura 1	<0.1	0.4	0.3094	0.1
	Lectura 2	<0.1	0.4	0.3182	0.1
	Lectura 3	<0.1	0.4	0.3140	0.1
90 minutos	Lectura 1	<0.1	0.4	0.0533	0.1
	Lectura 2	<0.1	0.4	0.0533	0.1
	Lectura 3	<0.1	0.4	0.0533	0.1
120 minutos	Lectura 1	<0.1	0.4	0.1722	0.1
	Lectura 2	<0.1	0.4	0.1730	0.1
	Lectura 3	<0.1	0.4	0.1726	0.1
150 minutos	Lectura 1	<0.1	0.4	2.1168	0.1
	Lectura 2	<0.1	0.4	2.1757	0.1
	Lectura 3	<0.1	0.4	2.1460	0.1
180 minutos	Lectura 1	<0.1	0.4	7.4610	0.1
	Lectura 2	<0.1	0.4	7.6280	0.1
	Lectura 3	<0.1	0.4	7.5450	0.1
210 minutos	Lectura 1	0.5424	0.4	18.4320	0.1
	Lectura 2	0.5529	0.4	18.7780	0.1
	Lectura 3	0.5522	0.4	18.6057	0.1
240 minutos	Lectura 1	0.7345	0.4	29.4110	0.1
	Lectura 2	0.7350	0.4	28.5930	0.1
	Lectura 3	0.7325	0.4	29.0020	0.1
270 minutos	Lectura 1	1.3013	0.4	36.4850	0.1
	Lectura 2	1.3042	0.4	35.5720	0.1
	Lectura 3	1.3027	0.4	37.4030	0.1

La tabla N°1 expresa la cuantificación por EAA de las muestras líquidas obtenidas en la columna de biosorción por método de extracción por Aparato Soxhlet y su respectivo límite dado por la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO 13.49.01:09) Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Rector, se obtuvo que desde el minuto 60 hasta el minuto 180 la norma se cumple en los límites establecidos, por tanto, la broza de “café” capta el plomo de la solución combinada usada en el análisis. Mientras que para cadmio se cumple con los valores de la norma en el minuto 90, esto se debe a que el cadmio es un metal pesado coadyuvante en la solución para que el plomo sea adherido al material biosorbente, una vez que el plomo es captado este sobresatura los sitios del biosorbente llegando a un punto de saturación donde ya no permite absorber más metales pesados siendo este el caso del cadmio.

Para cadmio hubo una menor absorción en la broza de “café” debido a la competencia por las zonas de absorción del material absorbente en este caso la broza de “café”, en el método de extracción por Aparato Soxhlet la broza es desengrasada con hexano por tanto disminuye la absorción de los iones cadmio.

Tabla N°2. Resultados obtenidos de la medición por Espectrofotometría de Absorción Atómica de la broza de “café” por Cafetera Doméstica.

Tiempo(minutos)	Medición	Plomo(ppm)	Límite de la NSO (ppm)	Cadmio(ppm)	Límite de la NSO (ppm)
30 minutos	Lectura 1	0.4447	0.4	0.8596	0.1
	Lectura 2	0.4642	0.4	0.8479	0.1
	Lectura 3	0.4545	0.4	0.8538	0.1
60 minutos	Lectura 1	<0.1	0.4	0.1726	0.1
	Lectura 2	<0.1	0.4	0.1776	0.1
	Lectura 3	<0.1	0.4	0.1751	0.1
90 minutos	Lectura 1	<0.1	0.4	0.1847	0.1
	Lectura 2	<0.1	0.4	0.1901	0.1
	Lectura 3	<0.1	0.4	0.1872	0.1
120 minutos	Lectura 1	<0.1	0.4	1.6488	0.1
	Lectura 2	<0.1	0.4	1.6793	0.1

Tabla N°2. Continuación

	Lectura 3	<0.1	0.4	1.6638	0.1
150 minutos	Lectura 1	<0.1	0.4	4.9340	0.1
	Lectura 2	<0.1	0.4	4.8210	0.1
	Lectura 3	<0.1	0.4	4.8750	0.1
180 minutos	Lectura 1	<0.1	0.4	15.2581	0.1
	Lectura 2	<0.1	0.4	14.7820	0.1
	Lectura 3	<0.1	0.4	15.0200	0.1
210 minutos	Lectura 1	<0.1	0.4	24.4550	0.1
	Lectura 2	<0.1	0.4	24.6930	0.1
	Lectura 3	<0.1	0.4	24.2130	0.1
240 minutos	Lectura 1	0.2101	0.4	30.3160	0.1
	Lectura 2	0.2004	0.4	30.5560	0.1
	Lectura 3	0.2101	0.4	30.4330	0.1
270 minutos	Lectura 1	0.8454	0.4	37.6620	0.1
	Lectura 2	0.8454	0.4	38.4290	0.1
	Lectura 3	0.8454	0.4	38.0460	0.1

La tabla N°2 expresa la cuantificación por EAA de las muestras líquidas obtenidas en la columna de biosorción por método de extracción por Cafetera Doméstica y su respectivo límite dado por la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO 13.49.01:09) Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Rector, se obtuvo que desde el minuto 60 hasta el minuto 210, la norma se cumple en los límites establecidos, por tanto, la broza de "café" capta el plomo de la solución de metales combinados usada en el análisis. Mientras que para cadmio no se logra el mismo resultado ya que los valores obtenidos por EAA sobrepasan los estipulados por la NSO 13.49.01:09, se conoce por bibliografía consultada que el cadmio y plomo compiten por los iones H^+ y los sitios de adsorción de la broza de "café" a pH 6 como el de nuestra solución de metales combinados; el plomo es fácilmente captado en los poros de la broza de "café", siendo el cadmio un coadyuvante en este proceso de adsorción por lo cual este no alcanza a cumplir con las concentraciones esperadas en el proceso.

Se conoce que la presencia de otros iones en la solución provoca la competencia por sitios disponibles en el material biosorbente por lo cual el metal de interés o dominante en la solución se adsorba en mayor cantidad por lo cual disminuye la adsorción del otro metal pesado presente en la solución en nuestro caso el cadmio.

La adsorción de los metales pesados plomo y cadmio en la broza de “café” es llevada a cabo por medio de un mecanismo químico y físico, ya que la broza de “café” actúa como un intercambiador iónico ácido.⁽²⁴⁾

5.3.1 Caracterización fitoquímica de la broza de “café”.

Los componentes principales de los residuos de “café” son los grupos funcionales hidroxilos y carboxilo, los cuales intervienen en el proceso de biosorción, este se debe a las interacciones entre los solutos y los grupos funcionales en la superficie del sorbente sólido.⁽¹⁵⁾⁽²⁴⁾

La alta capacidad de biosorción conferida a la broza de “café” es debida a su composición química, ya que posee en su materia orgánica: Taninos, Polialginatos, Peptidoglucanos, Polisacáridos, Glicoproteínas, Fucanoides, Compuestos heterocíclicos, Flavonoides, Ácidos clorogénicos, Ácidos feruloilquínicos, entre otros compuestos que permiten atrapar los metales pesados y dejarlos adheridos a la superficie del adsorbente.⁽¹³⁾

En la broza de “café” resalta la actividad quelante que cumplen los compuestos fenólicos, polifenólicos, no fenólicos y flavonoides para atraer cationes metálicos, lo que hace notorio que la adsorción no solo la cumple la celulosa, sino también el conjunto de todas las sustancias mencionadas a través de su actividad quelante permiten que los cationes metálicos sean adsorbidos en la superficie celulósica de la broza de “café”.⁽¹³⁾

Los grupos funcionales presentes en el bioadsorbente tiene mayor afinidad con los iones que presentan mayor radio iónico como el Pb que es de 1.20, este tiene mayor radio que el Cd que es de 0.97, esto explica porque la broza de “café” tiende a tener mayor capacidad de bioadsorción para plomo a diferencia del cadmio.⁽¹³⁾

Los compuestos fitoquímicos que se ven involucrados en la broza de “café”, de acuerdo a lo reportado en la literatura, se resumen en la Tabla N°3; donde se muestran los metabolitos secundarios encontrados en los diferentes órganos y estados del “café”.

Tabla N°3. Compuestos fitoquímicos reportados por literatura en la broza de “café”.

METABOLITO SECUNDARIO	ESPECIE VEGETAL					
	<i>Coffea arabica</i>					
	Broza de Café	Granos de Café	Pulpa de Café	Café Tostado	Hojas de Café	Cascarilla de Café
Glicósidos Cardiotónicos ⁽¹³⁾⁽²⁴⁾	-	-	-	-	-	+/-
Flavonoides ⁽¹³⁾⁽²⁴⁾⁽⁴⁸⁾⁽⁶⁴⁾⁽⁶⁸⁾	+	+	+	+	-	+/-
Aceites esenciales ⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁸⁾⁽⁶⁴⁾	-	+	-	+	-	-
Taninos y compuestos fenólicos ⁽¹³⁾⁽⁴⁸⁾⁽⁵¹⁾⁽⁶⁴⁾⁽⁶⁸⁾⁽⁶⁹⁾	+	+	+	+	-	-
Alcaloides ⁽¹³⁾⁽²⁴⁾⁽⁴⁸⁾⁽⁵¹⁾⁽⁶⁴⁾⁽⁶⁸⁾⁽⁶⁹⁾	+	+	+	+	+	+
Triterpenos ⁽⁶⁰⁾⁽⁶⁸⁾	+	-	-	-	-	+

5.4 Comparar los resultados obtenidos con los que establece la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO 13.49.01:09) Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor, para los niveles de plomo y cadmio en agua.

La Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO 13.49.01:09) Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor, nos expresa los valores máximos permisibles para plomo son de 0.4 mg/L o 0.4 ppm y cadmio son de 0.1 mg/L o 0.1 ppm. (Ver Anexo N°1).⁽¹⁵⁾

Los resultados obtenidos con el método de preparación en el Aparato Soxhlet, cumpliendo las concentraciones establecidas en la NSO 13.49.01:09, para plomo en los siguientes tiempos: 60 min., 90 min., 120 min., 150 min. y para cadmio se cumplió en el tiempo 90 min.

Por tanto el método de preparación de Aparato Soxhlet para plomo y cadmio con la broza de “café” se obtuvo agua para el reusó que cumplió los valores estipulados de estos metales pesados analizados en la NSO 13.49.01:09 a los 90 minutos; por lo tanto la broza de “café” puede ser utilizada como un biofiltro para tratamiento de las aguas residuales contaminadas con metales pesado como lo son plomo y cadmio, este es un material que puede ser utilizado para retirar 2 de los contaminantes más tóxicos que están dañando el ambiente; en la Norma Salvadoreña se analizan ciertas condiciones, elementos, materiales y metales pesados que en este análisis no fueron estudiados, por lo que para que esta agua pueda ser descargada en un cuerpo receptor, debe ser analizado para todos los aspectos que esta norma exige.

Los resultados obtenidos con el método de preparación en Cafetera Doméstica, cumpliendo las concentraciones establecidas por la NSO 13.49.01:09, para plomo en los siguientes tiempos: 60 min., 90 min., 120 min., 150 min., 180 min., 210 min. y 240 min. En cuanto a cadmio, no se logró cumplir las concentraciones en ningún tiempo.

Por tanto, el método de preparación de Cafetera Doméstica para plomo y cadmio con broza de “café” no se obtuvo los resultados que esperábamos, ya que no se cumplieron los valores permitidos para cadmio los cuales están estipulados en la Norma Salvadoreña, se conoce por bibliografía que el cadmio es un coadyuvante para la adsorción del plomo, por lo cual se obtuvo una menor adsorción de cadmio en nuestro análisis.⁽¹⁰⁾

Con lo expresado anteriormente podemos hacer referencia a la importancia de la implementación de biofiltros a base de biomasas como lo es la broza de “café” para la remoción de contaminantes tóxicos como lo son el plomo y cadmio del medio ambiente y de aguas residuales, para así contrarrestar los daños medioambientales que dichos metales pesados están causando por su excesiva acumulación en la tierra, agua, aire y en la salud de la población, entre los daños más perjudiciales que podemos mencionar son la insuficiencia renal por su acumulación, daños pulmonares por la inhalación, los efectos endocrinos y en el peor de los casos la muerte silenciosa de muchas personas por envenenamiento de estos metales pesados.⁽⁴⁾⁽¹⁶⁾

5.5 Aplicar los modelos matemáticos al proceso de absorción en columna para la determinación de metales pesados en broza de “café”.

Los modelos de biosorción aplicados en este estudio son los siguientes: Modelo de Thomas, Modelo de Dosis Respuesta y la Isotherma de Langmuir, los cuales fueron aplicados a las 3 lecturas por separado y por cada método de preparación de broza de “café”.

Aplicando los modelos matemáticos a los datos experimentales obtenemos la curva de ruptura para cada metal pesado y método de preparación. Los tiempos de ruptura fueron determinados en los minutos 210 para plomo y 120 para cadmio en ambos métodos de preparación de broza de “café”.

5.5.1 Aplicación de los modelos de biosorción en columna.

5.5.1.1 Aplicación de los modelos de biosorción en columna, Lectura N°1.

5.5.1.1.1 Aplicación del Modelo de Dosis Respuesta.

-Broza de “café” preparada en Aparato Soxhlet.

-Plomo: tomando los datos obtenidos de la concentración de Pb en la lectura N°1, perteneciente a la broza de “café” preparada en Aparato Soxhlet, se graficó el $\ln(C/C_0 - C)$ contra V_{ol} . se obtiene el siguiente grafico:

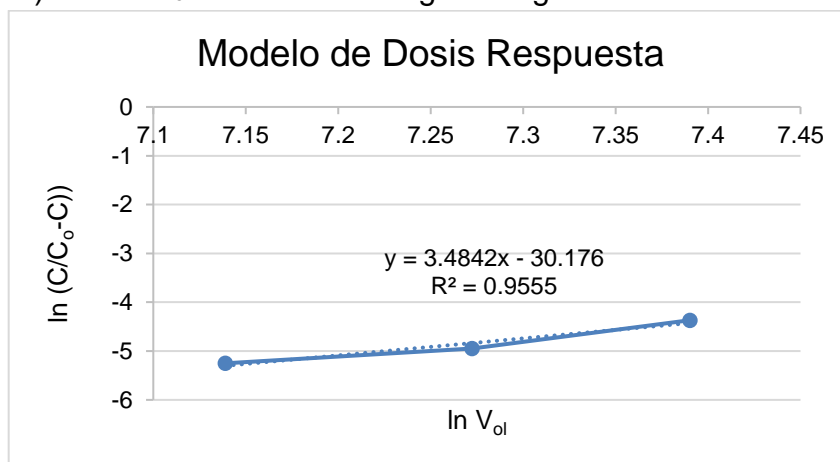


Figura N°4. Gráfica Dosis Respuesta plomo/Soxhlet, lectura 1.

Utilizando la ecuación de la recta obtenida en la gráfica y la ecuación 1, encontramos los valores de α y q_0 de la siguiente manera:

$$Y = 3.4842x - 30.176 \quad R^2 = 0.9555$$

$$\alpha = 3.4842$$

$$\alpha \ln\left(\frac{q_0(mb)}{C_0}\right) = -30.176$$

$$\ln\left(\frac{q_0(mb)}{C_0}\right) = \frac{-30.176}{3.4842}$$

$$\left(\frac{q_0(mb)}{C_0}\right) = e^{-8.660}$$

$$q_0 = \frac{e^{-8.660} (C_0)}{mb}$$

$$q_0 = \frac{e^{-8.660} \left(104.04 \frac{\text{mg}}{\text{mL}}\right)}{(40 \text{ g})}$$

$$q_0 = 4.509 \times 10^{-4} \text{ mg/g}$$

-Cadmio: tomando los datos obtenidos de la concentración de Cd en la lectura N°1, pertenecientes a la broza de “café” preparada por el Aparato Soxhlet, se grafica el $\ln(C/C_0 - C)$ contra $\ln V_{ol.}$, y se obtiene el siguiente gráfico:

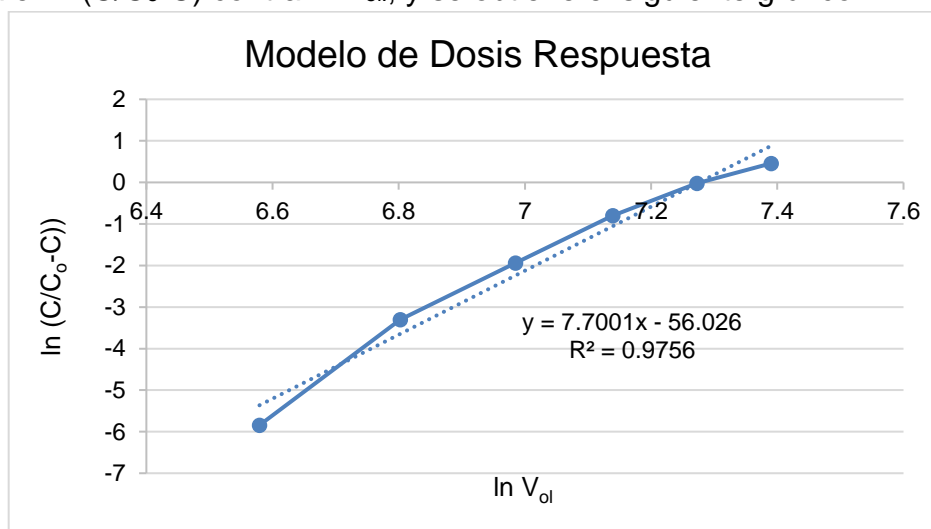


Figura N°5. Gráfica Dosis Respuesta cadmio/Soxhlet, lectura 1.

Utilizando la ecuación 1 y los datos experimentales obtenidos de la figura N°5, obtenemos los valores de $\alpha = 7.7001$, $q_0 = 1.030 \times 10^{-3} \text{ mg/g}$ y $R^2 = 0.9756$.

-Broza preparada por Cafetera doméstica:

-Plomo y cadmio: El procesamiento de datos para la determinación de los parámetros del Modelo de Dosis Respuesta resultante de la columna preparada con la broza de café preparada en Cafetera Doméstica, se realizó de igual forma que en los obtenidos por la broza preparada en Aparato Soxhlet, tanto para Pb como para Cd, los resultados de dichos parámetros están resumidos en la Tabla N°4.

5.5.1.1.2 Aplicación del Modelo de Thomas.

-Broza preparada en Aparato Soxhlet:

-Plomo: tomando los datos obtenidos de la concentración de Pb en la lectura N°1, pertenecientes a la broza de “café” preparada en Aparato Soxhlet, se grafica el $\ln((C_0/C)-1)$ contra V_{ef} , y se obtiene el siguiente gráfico:

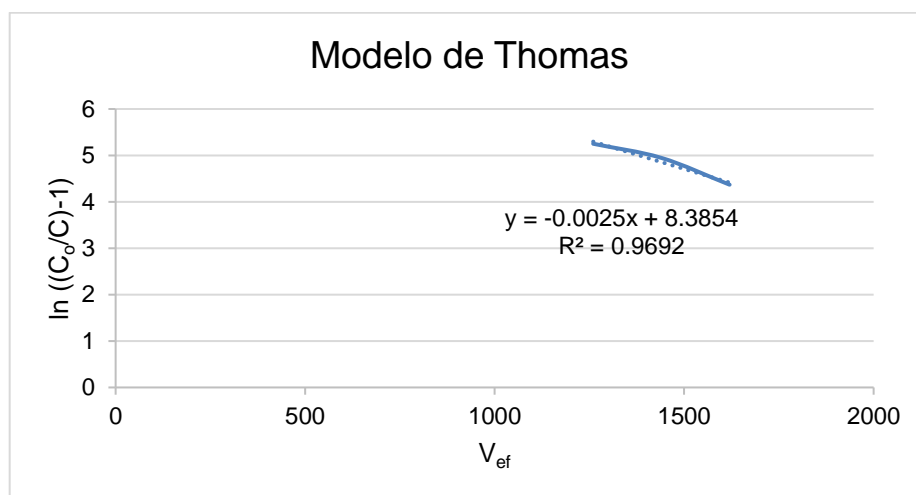


Figura N°6. Gráfica Modelo Thomas plomo/Soxhlet, lectura 1.

Utilizando la ecuación de la recta y la ecuación 2 encontramos los valores de Kth y q_0 , de la siguiente manera:

$$Y = -0.0025x + 8.3854 \quad R^2 = 0.9692$$

$$\ln \left[\left(\frac{C_0}{C} \right) - 1 \right] = \frac{K_{th}(q_0)(m)}{Q} - \frac{K_{th}(C_0)}{1000(Q)} V_{ef}$$

$$-\frac{K_{th}(C_0)}{1000(Q)} = -0.0025$$

$$-K_{th} = \frac{-0.0025(1000)(Q)}{C_0}$$

$$-K_{th} = \frac{-0.0025(1000)(6\text{mL})}{104.04 \frac{\text{mg}}{\text{mL}}}$$

$$K_{th} = 0.144 \text{ (mL/min.mg)}$$

$$\frac{K_{th}(q_0)(m)}{Q} = 8.3854$$

$$q_0 = \frac{8.3854(6\text{mL})}{(0.144)(40 \text{ g})}$$

$$q_0 = 8.734 \frac{\text{mg}}{\text{g}}$$

-Cadmio: tomando los datos obtenidos de la concentración de Cd en la lectura N°1, pertenecientes a la broza de “café” preparada en Aparato Soxhlet, se grafica el $\ln((C_0/C)-1)$ contra V_{ef} , y se obtiene el siguiente gráfico:

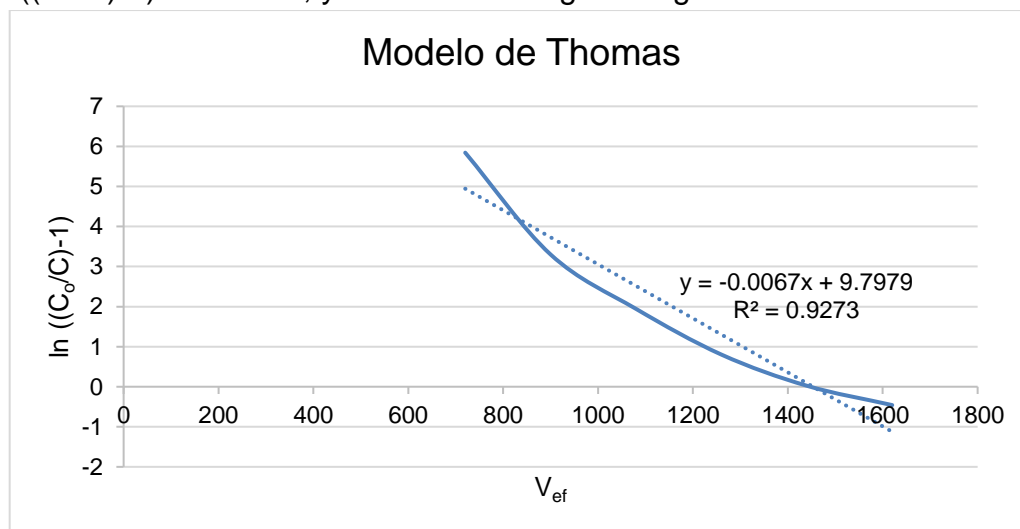


Figura N°7. Gráfica Modelo Thomas cadmio/Soxhlet, lectura 1.

Utilizando la ecuación 2 y los datos experimentales obtenidos en la figura N°7, obtenemos los valores de $K_{th}=0.675$ ml/min.mg, $q_0= 2.177$ mg/g y $R^2= 0.9273$ para esta lectura.

-Broza preparada en Cafetera Doméstica:

-Plomo y cadmio: El procesamiento de datos para la determinación de los parámetros del Modelo de Thomas resultante de la columna preparada con la broza de café preparada en Cafetera Doméstica, se realizó de igual forma que en los obtenidos por la broza preparada en Aparato Soxhlet, tanto para Pb como para Cd, los resultados de dichos parámetros están resumidos en la Tabla N°5.

5.5.1.1.3 Aplicación de la Isotherma de Langmuir.

-Broza preparada en Aparato Soxhlet:

-Plomo: tomando los datos obtenidos de la concentración de Pb en la lectura N°1, pertenecientes a la broza de “café” preparada en Aparato Soxhlet, se grafica el C/Q_v contra C, y se obtiene el siguiente gráfico:

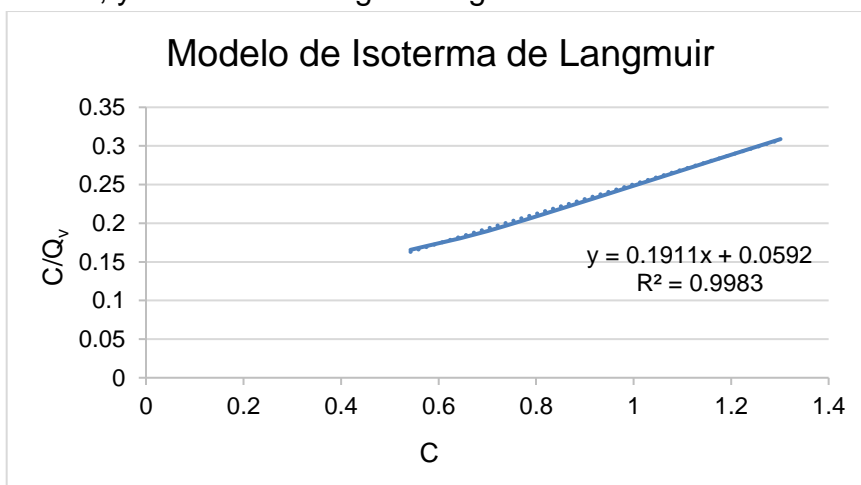


Figura N°8. Gráfica Isotherma Langmuir plomo/Soxhlet, lectura 1.

Utilizando la ecuación 3 y los datos experimentales obtenidos en la figura N°8, obtenemos los valores de q_{max} y b , de la siguiente manera:

$$Y=0.1911x +0.0592 \quad R^2= 0.9983$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b(q_{max})} + \frac{1}{q_{max}} * C_e$$

$$\frac{1}{q_{\max}} = 0.1911$$

$$q_{\max} = \frac{1}{0.1911}$$

$$q_{\max} = 5.232 \text{ (mg. g}^{-1}\text{)}$$

$$0.0592 = \frac{1}{b (q_{\max})}$$

$$b = \frac{1}{(0.0592)(q_{\max})}$$

$$b = \frac{1}{(0.0592)(5.232)}$$

$$b = 3.228 \text{ (L.mg}^{-1}\text{)}$$

-Cadmio: tomando los datos obtenidos de la concentración de Cd en la lectura N°1, pertenecientes a la broza de “café” preparada en Aparato Soxhlet, se grafica el C/Q_v contra C , y se obtiene el siguiente gráfico:

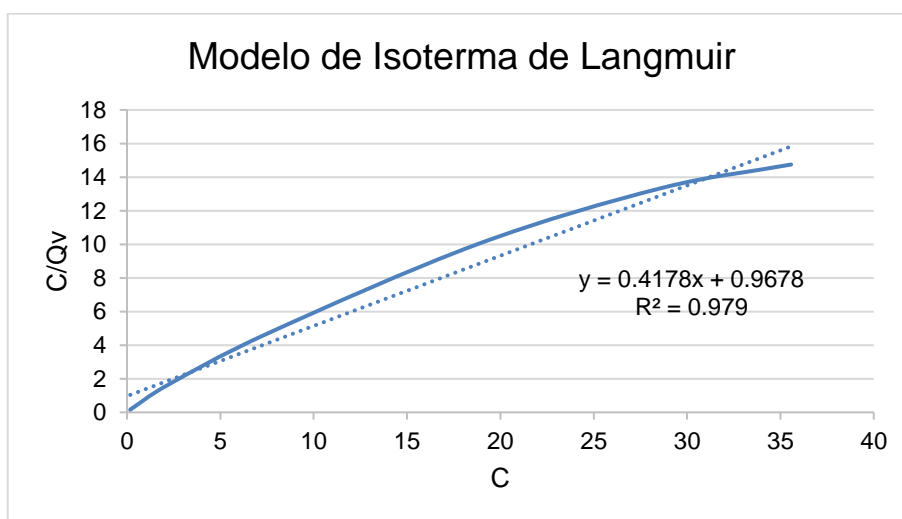


Figura N°9. Gráfica Isoterma Langmuir cadmio/Soxhlet, lectura 1.

Utilizando la ecuación 3 y los datos experimentales obtenidos en la figura N°9, obtenemos los valores de $q_{\max} = 2.393 \text{ mg. g}^{-1}$, $b = 0.432 \text{ L.mg}^{-1}$ y $R^2 = 0.979$.

-Broza preparada en Cafetera Doméstica:

-Plomo y cadmio: El procesamiento de datos para la determinación de los parámetros de la Isoterma de Langmuir resultante de la columna preparada con la broza de café preparada en Cafetera Doméstica, se realizó de igual forma que en los obtenidos por la broza preparada en Aparato Soxhlet, tanto para Pb como para Cd, los resultados de dichos parámetros están resumidos en la Tabla N°6.

5.5.1.2 Aplicación de los modelos de biosorción en columna utilizando gráficas, Lectura N°2 y N°3.

El procesamiento de datos de las lecturas N°2 y N°3, se realizó de igual forma, como se muestra en la sección 5.5.1.1.5

5.5.2 Parámetros obtenidos en los modelos de biosorción.

Tabla N°4. Parámetros de biosorción aplicando el Modelos Dosis Respuesta

Modelo de biosorción de Dosis Respuesta de broza de "Café".					
	PARAMETROS	METALES PESADOS/METODO DE EXTRACION			
		Pb/Cafetera	Cd/Cafetera	Pb/Soxhlet	Cd/Soxhlet
Lectura 1	α	8.457	5.1398	3.4842	7.7001
	$q_o(\text{mg/g})$	8.955×10^{-4}	1.059×10^{-4}	4.509×10^{-4}	1.030×10^{-3}
	R^2	0.9562	0.9842	0.9555	0.9756
Lectura 2	α	8.4492	5.1946	3.4149	7.6055
	$q_o(\text{mg/g})$	8.928×10^{-4}	1.062×10^{-3}	4.389×10^{-4}	1.027×10^{-3}
	R^2	0.9455	0.9874	0.9485	0.9713
Lectura 3	α	8.457	5.1613	3.415	7.7301
	$q_o(\text{mg/g})$	8.946×10^{-4}	1.059×10^{-3}	4.389×10^{-4}	1.033×10^{-3}
	R^2	0.9562	0.9866	0.9473	0.9768
Promedio	α	8.4544	5.1652	3.4338	7.6785
	$q_o(\text{mg/g})$	8.943×10^{-4}	7.423×10^{-4}	4.429×10^{-4}	1.03×10^{-3}
	R^2	0.9526	0.9861	0.9504	0.9746

Tabla N°5. Parámetros de biosorción aplicando el Modelo de Thomas

Modelo de biosorción de Thomas de broza de "Café".					
	PARAMETROS	METALES PESADOS/METODO DE EXTRACION			
		Pb/Cafetera	Cd/Cafetera	Pb/Soxhlet	Cd/Soxhlet
Lectura 1	K_{th} (mL/min/mg)	0.340	0.453	0.144	0.675
	q_o (mg/g)	6.420	2.130	8.734	2.177
	R^2	0.9698	0.9475	0.9692	0.9273
Lectura 2	K_{th} (mL/min/mg)	0.340	0.453	0.138	0.665
	q_o (mg/g)	6.427	2.133	9.032	2.186
	R^2	0.9608	0.9495	0.9633	0.9202
Lectura 3	K_{th} (mL/min/mg)	0.340	0.463	0.138	0.685
	q_o (mg/g)	6.420	2.094	9.035	2.150
	R^2	0.9698	0.9525	0.9622	0.9296
Promedio	K_{th} (mL/min/mg)	0.340	0.4563	0.14	0.675
	q_o (mg/g)	6.4223	2.119	8.9336	2.171
	R^2	0.9658	0.9498	0.9366	0.9257

Tabla N°6. Parámetros de Biosorción aplicando la Isotherma de Langmuir

Modelo de biosorción de la Isotherma de Langmuir de broza de "Café".					
	PARAMETROS	METALES PESADOS/METODO DE EXTRACION			
		Pb/Cafetera	Cd/Cafetera	Pb/Soxhlet	Cd/Soxhlet
Lectura 1	q_{max} (mg. g ⁻¹)	4.382	2.510	5.232	2.393
	b (L.mg ⁻¹)	29.637	0.200	3.228	0.432
	R^2	1.0	0.9619	0.9983	0.9790
Lectura 2	q_{max} (mg. g ⁻¹)	4.382	2.510	5.258	2.393
	b (L.mg ⁻¹)	29.637	0.200	3.143	0.432
	R^2	1.0	0.9619	0.9976	0.979
Lectura 3	q_{max} (mg. g ⁻¹)	4.386	2.515	5.255	2.402
	b (L.mg ⁻¹)	28.860	0.199	3.155	0.422
	R^2	1.0	0.9609	0.9975	0.9806
Promedio	q_{max} (mg. g ⁻¹)	4.3833	2.512	5.2483	2.396
	b (L.mg ⁻¹)	29.378	0.1996	3.1753	0.4286
	R^2	1.0	0.9615	0.9978	0.9795

Las tablas N°4, 5 y 6 nos muestran los resultados obtenidos en cada lectura y por modelo de biosorción, con base a los resultados promediados para el Coeficiente de Correlación (R^2) y la Capacidad de remoción Q_{\max} promedio.

Los estudios donde se plantean los modelos matemáticos ayudan a determinar las variables que facilitan o mejoran la eficacia en la remoción de contaminantes como lo son los metales pesados, así como también las cinéticas o las isotermas de adsorción.

La cinética de estos modelos describe la velocidad en la cual el contaminante se remueve de la solución acuosa tratada.⁽³⁰⁾ Por otro lado las Isotermas de adsorción nos permiten predecir la capacidad de retención de un metal en cualquier concentración, buscando predecir el mecanismo de la biosorción.⁽¹²⁾⁽³⁷⁾

Las columnas de lecho continuo son adecuadas para procesos de biosorción ya que se aprovechan al máximo la diferencia de concentraciones, que fuerzan el proceso de adsorción y permiten una mayor eficiencia de la capacidad de retención del adsorbente, aunque la mayor parte de la capacidad de adsorción de la columna depende de las condiciones de operación y de la naturaleza de la sustancia o del biosorbente.⁽³⁷⁾

Nuestro trabajo evaluó la eficiencia de la remoción de plomo y cadmio de aguas residuales usando broza de “café” tratada por 2 métodos diferentes de extracción siendo estos por Cafetera Doméstica y Aparato Soxhlet con el propósito de crear un biofiltro con dichas brozas obtenidas.

El proceso fue realizado en 2 columnas de lecho continuo por separado, en donde los resultados obtenidos se observó la retención de plomo y cadmio aumenta a medida que pasa el tiempo y disminuye cuando se alcanza el equilibrio en la columna a este punto se conoce como Curva de Ruptura, la cual fue analizada en función al tiempo y la concentración adsorbida de cada metal pesado en la columna. La concentración está dada en función del tiempo y de la altura del material de relleno colocado en la columna. El tiempo involucrado en el proceso

de biosorción y la forma de las curvas son características importantes para determinar que el proceso de biosorción en columna fue efectivo.

El proceso de biosorción en las columnas nos ayudó a predecir el comportamiento dinámico de los iones plomo y cadmio cuando el biosorbente (broza de “café”) los va atrapando en su composición química y mediante estos modelos obtenemos los parámetros cinéticos con los que se realizó los cálculos pertinentes de las diferentes ecuaciones que se plantean en cada modelo o isoterma de adsorción donde determinamos cual se adecuó mejor al proceso de biosorción en columna.

Con los datos obtenidos en los cálculos realizados anteriormente se constató que la Isoterma de Langmuir describe mejor la adsorción de los componentes, se emplearon los parámetros donde nos refleja la naturaleza del adsorbente (broza de “café”) en el cual se compara el rendimiento del proceso de adsorción en columna, obteniendo un coeficiente de correlación (R^2) cercano a 1 y la Q_{max} promedio fue la más alta en comparación con los obtenidos en los otros modelos planteados en este análisis.

5.6 Realizar una comparación entre los métodos de extracción por Cafetera Doméstica y Aparato Soxhlet de la broza de “café” planteados en el análisis.

Para la realización de esta comparación nos auxiliamos de las lecturas obtenidas por EAA en el Laboratorio de Química Agrícola, dichas lecturas fueron analizadas por separado y por cada método de extracción planteado (Aparato Soxhlet y Cafetera Doméstica) aplicando a estos datos los modelos de biosorción antes mencionados. Donde se calculó la Capacidad de Biosorción en cada modelo (Q_{max} y q_0) y el Coeficiente de Correlación (R^2). El valor de R^2 nos sirvió para definir cuál de los modelos utilizados se ajustó mejor al proceso de biosorción en columna removiendo metales pesados (plomo y cadmio) con la broza de “café”.

Además, se realizó un análisis con el programa Statgraphics Versión 19 donde se obtuvo una comparación de medias de la Capacidad Máxima de Adsorción del metal pesado, es decir los valores de Q_{max} para plomo y cadmio por Cafetera

Doméstica y Aparato Soxhlet, utilizando el programa ANOVA obteniendo los siguientes resultados:

5.6 1 Análisis Estadístico ANOVA de plomo/Cafetera-plomo/Soxhlet.

Tabla N°7. ANOVA Estadístico para plomo/Cafetera-plomo/Soxhlet.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1.12234	1	1.12234	10809.03	0.00001
Intra grupos	0.000415333	4	0.000103833		
Total (Corr.)	1.12275	5			

5.6.1.1 Interpretación del Análisis Estadístico.

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en 2 componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 10809.0, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Puesto que el valor P de la prueba F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 2 variables con un nivel del 5% de significación. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

5.6.2 Análisis Estadístico ANOVA cadmio/Cafetera-cadmio/Soxhlet.

Tabla N°8. ANOVA Estadístico para cadmio/Cafetera-cadmio/Soxhlet.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.0200682	1	0.0200682	1135.93	0.00001
Intra grupos	0.0000706667	4	0.0000176667		
Total (Corr.)	0.0201388	5			

5.6.2.1 Interpretación del Análisis Estadístico.

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en 2 componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. La razón F, que en este caso es igual a 1135.93, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Puesto que el valor P de la prueba F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 2 variables con un nivel del 5% de significación. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

En base a los resultados obtenidos en las tablas ANOVA, se afirma con el 95% de confianza que existe diferencia significativa entre los 2 métodos de preparación de la broza del café estudiados, siendo mejor método de preparación por Cafetera Doméstica para cadmio y el preparado por Soxhlet mejor para plomo, debido a que sus q_{\max} promedio son mayor, lo que significa que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

Por lo tanto, la broza preparada por medio de Cafetera Doméstica tiene mayor la capacidad de captar plomo y la preparada por Aparato Soxhlet capta mayor cantidad de cadmio, utilizando las condiciones necesarias de este estudio.

Se conoce bibliográficamente que se han usado diversos materiales donde se ha evaluado la capacidad de adsorción con respecto a los iones plomo y cadmio, además de otros materiales pesados en cuestión. La Tabla N°9 nos presenta las capacidades de adsorción encontradas para otros materiales de desecho evaluados en este tipo de operación como la que fue realizada en nuestra investigación. En algunos materiales las capacidades de adsorción son superiores a las obtenidas en nuestro análisis con broza de “café”.

Tabla N°9. Capacidades de adsorción de diferentes materiales

Metal pesado	Tipo de adsorbente	Capacidad de remoción	Modelo de Biosorción	Referencias Bibliográficas
Plomo Cobre	Café molido + Paja de trigo	158.73 mg/g 97.10 mg/g	Langmuir	(10)
Plomo Cadmio Zinc Cobre	Café gastado (Broza de “Café”)	0.2388 mmol/g 0.1032 mmol/g 0.0576 mmol/g 0.0306 mmol/g	Langmuir	(75)
Cromo (VI)	Café gastado (Broza de “Café”)	87.72 mg/g	Freundlinch	(14)
Cadmio	Café gastado (Broza de “Café”)	16.20 mg/g	Langmuir	(25)
Plomo	Cáscara de café	5.20 mg/g	Langmuir	(7)

Tabla N°9. Continuación

Plomo	Cáscara de café	37.04 mg/g	Freundlinch	(2)
Mercurio	Café gastado (Broza de “Café”)	31.75 mg/g	Langmuir	(53)
Plomo	Café gastado (Broza de “Café”)	16.60	Freundlinch	(61)
Cadmio		21.70		
Arsénico (III)		8.60		
Arsénico (V)		10.90		
Cadmio	Café gastado (Broza de “Café”)	15.65 mg/g	Langmuir	(6)
Cadmio	Granos de café	5.98×10^{-2} mmol/g	Langmuir	(37)
Plomo	Cáscara de café	91.10 %	Langmuir	(8)
Cobre (III)		89 – 98 %		
Zinc (III)	Cáscara de café	65 – 85 %	Langmuir	(58)
Cadmio (III)		48 – 79 %		
Plomo	Broza de Café	4.386mg/g	Langmuir	Estudio en curso
Cadmio	(Cafetera)	2.515mg/g		
Plomo	Broza de Café	5.255mg/g	Langmuir	Estudio en curso
Cadmio	(Soxhlet)	2.402mg/g		

En diferentes literaturas también encontramos comparaciones de las capacidades de adsorción de distintos materiales de desecho como los siguientes:

Se realizaron investigaciones donde estudiaron las aguas con Cr (IV) de la industria de curtido de pieles, en relación a residuos de “café” gastado (broza de “café”) y carbón activado preparado con este, se encontró que la Isoterma de Freundlinch se ajusta adecuadamente en comparación con el modelo de Langmuir. Allí se concluyó que cuando no se modifica el adsorbente se presenta una capacidad de adsorción baja al compararlo con otros materiales adsorbentes.⁽²³⁾

Se comparo la capacidad máxima de adsorción del residuo de “café” vrs la de té con una solución preparada de iones Cr (VI) y una concentración de 10 mg/L de este metal a una temperatura de 30°C, a un pH 7 y una agitación de 150 rpm. El tiempo de contacto con ambos residuos fue de 60 minutos. Al final se encontró que la adsorción final del “café” fue de 87.72 mg/g y la del té fue de 93.34 mg/g.⁽¹⁴⁾

Se encontró en el estudio de remoción de Pb y Cu con “café” residual modificado químicamente que las eficiencias de adsorción son mucho mejor cuando se cambian las propiedades del material con Ácido Cítrico 0.6 M la modificación química produce un aumento de los grupos carboxílicos, situación que mejora considerablemente la capacidad de adsorción. El modelo de Langmuir presta mejor ajuste y un coeficiente de correlación (R^2). Haciendo referencia a la cinética química, se evidencio que en los primeros minutos del proceso se presentan altas velocidades de captura de los metales, pero con el paso del tiempo la adsorción se estabiliza a los 200 y 500 minutos par Cu y el Pb respectivamente. El tiempo en el que se alcanza el equilibrio fue de 8 y 4 horas para el Pb y Cu respectivamente, siendo el modelo de pseudo segundo orden el de mayor ajuste.⁽¹⁰⁾

Minamisawa (2004) analizo los residuos provenientes del té verde, quitosano y los residuos de “café”, demostraron que la cinética de adsorción es rápida, ocurriendo en los primeros 20 minutos del 80% de la tasa de captura de los metales y en los 40 minutos la tasa de saturación del adsorbente, con relación al pH el valor optimo fue de 4 y 6.7 para plomo y cadmio, respectivamente los autores usaron granos de “café” tostado de la Variedad *Coffea arabica* de Brasil, Colombia y Guatemala; y de la Variedad *Coffea Robusta* de Indonesia utilizada en el estudio relacionado con la eliminación de cadmio y plomo.⁽⁵⁰⁾

5.7 Capacidad máxima de remoción de plomo y cadmio de la broza de “café”.

En base al análisis realizado de las Tablas N°4, 5 y 6 especificados por cada método de preparación (Aparato Soxhlet y Cafetera Doméstica) y con la aplicación de los modelos de biosorción en columna se determinó que el modelo que mejor se ajustó a nuestro análisis es la Isoterma de Langmuir, ya que se

obtuvo un R^2 más cercano a 1 y la Q_{max} promedio fue la más alta en comparación con los obtenidos en los otros modelos planteados en este análisis.

Tabla N°10. Capacidad máxima de remoción de diferentes materiales.

Metal pesado	Tipo de adsorbente	Capacidad de remoción q_{max} (Isoterma de Langmuir)	Referencia Bibliografía
Plomo	Carbón activado	2.95 mg/g	(38)(47)
Cadmio Cromo ⁺³	Cascara de nuez	1.50 mg/g 1.33 mg/g	(38)(47)
Plomo Cadmio Cromo ⁺²	Corteza de pino	1.59- 3.33 mg/g 8.0 mg/g 19.45 mg/g	(47)
Cadmio Cromo ⁺³	Poso de té	1.63 mg/g 1.55 mg/g	(47)
Plomo Níquel	Bagazo de caña	44.55 mg/g 60.91 mg/g	(70)
Plomo Níquel	Cáscara de ñame	44.55 mg/g 65.11 mg/g	(70)
Plomo Cadmio Níquel Cobre	Rapa de uva	2.48×10^{-4} mg/g 2.28×10^{-4} mg/g 1.81×10^{-4} mg/g 1.59×10^{-4} mg/g	(32)
Plomo Cadmio	Cáscara de plátano	2.18mg/g 5.71mg/g	(9)
Plomo Cadmio	Broza de café (Soxhlet)	5.255 mg/g 2.402 mg/g	Estudio en curso
Plomo Cadmio	Broza de café (Cafetera)	4.386mg/g 2.515mg/g	Estudio en curso

Basándonos en los resultados en nuestro análisis y las Q_{max} promedios que fueron comparadas con los resultados de otros materiales estudiados en la tabla N°10 se pueden verificar los distintos materiales de relleno que son utilizadas para la remoción de metales pesados en columnas y que dan excelentes resultados constados por los valores que representan las Capacidades de Remoción que se muestran en la tabla antes descrita. Siendo estos materiales

de relleno unos buenos biosorbentes que ayudan al medio ambiente a contrarrestar la contaminación de metales pesados como lo son Pb y Cd.

La Capacidad máxima de remoción encontradas en la broza de “café” es grande en comparación de otros materiales de relleno conocidos por su eficiencia en la remoción de contaminantes, como lo puede ser el carbón activado, té entre otros. Quedando así demostrado que la broza de “café” puede ser un excelente material de relleno en la remoción de metales pesados como lo son plomo y cadmio.

5.8 Porcentaje de remoción de los metales pesados cadmio y plomo.

Con base a las Tablas N°11 y 12 el análisis de la solución combinada de plomo y cadmio se logró conocer la concentración real de ambos metales, antes del funcionamiento de la columna

La concentración real de plomo según los datos experimentales obtenidos por EAA fue:

$$\text{Conc. Pb(ppm)} = 102.98 + 105.18 + 103.96 = 312.12 \text{ ppm} \div 3 = 104.04 \text{ ppm}$$

La concentración real de cadmio según los datos experimentales obtenidos por EAA fue:

$$\text{Conc. Cd(ppm)} = 59.83 + 59.30 + 59.53 = 178.66 \text{ ppm} \div 3 = 59.99 \text{ ppm}$$

Los porcentajes de remoción se calcularon con las Ec. 4 y 5 para cada metal pesado obteniendo los siguientes resultados expresados en las siguientes tablas:

Tabla N°11. Porcentaje de remoción de plomo y cadmio por Aparato Soxhlet.

Tiempo(minutos)	Medición	% Plomo	% Cadmio
30 minutos	Lectura 1	99.57	98.56
	Lectura 2	99.55	99.58
	Lectura 3	99.56	99.56
60 minutos	Lectura 1	99.90	99.71
	Lectura 2	99.90	99.70
	Lectura 3	99.90	99.70
90 minutos	Lectura 1	99.90	99.69
	Lectura 2	99.90	99.68
	Lectura 3	99.90	99.68

Tabla N°11. Continuación

120 minutos	Lectura 1	99.90	97.23
	Lectura 2	99.90	97.18
	Lectura 3	99.90	97.21
150 minutos	Lectura 1	99.90	91.71
	Lectura 2	99.90	91.90
	Lectura 3	99.90	91.81
180 minutos	Lectura 1	99.90	74.38
	Lectura 2	99.90	75.18
	Lectura 3	99.90	74.77
210 minutos	Lectura 1	99.90	58.93
	Lectura 2	99.90	58.53
	Lectura 3	99.90	59.34
240 minutos	Lectura 1	99.79	49.09
	Lectura 2	99.81	48.69
	Lectura 3	99.80	48.89
270 minutos	Lectura 1	99.19	36.75
	Lectura 2	99.19	35.47
	Lectura 3	99.19	36.11

Tabla N°12. Porcentaje de remoción de plomo y cadmio por Cafetera Doméstica.

Tiempo(minutos)	Medición	% Plomo	% Cadmio
30 minutos	Lectura 1	96.67	85.99
	Lectura 2	96.68	85.56
	Lectura 3	96.65	85.77
60 minutos	Lectura 1	99.90	99.48
	Lectura 2	99.90	99.46
	Lectura 3	99.90	99.47
90 minutos	Lectura 1	99.90	99.91
	Lectura 2	99.90	99.91
	Lectura 3	99.90	99.91
120 minutos	Lectura 1	99.90	99.71
	Lectura 2	99.90	99.70
	Lectura 3	99.90	99.71
150 minutos	Lectura 1	99.90	96.44
	Lectura 2	99.90	96.35
	Lectura 3	99.90	96.39
180 minutos	Lectura 1	99.90	87.47
	Lectura 2	99.90	87.19
	Lectura 3	99.90	87.33

Tabla N°12. Continuación

210 minutos	Lectura 1	99.48	69.05
	Lectura 2	99.46	68.47
	Lectura 3	99.47	68.75
240 minutos	Lectura 1	99.29	50.61
	Lectura 2	99.29	51.98
	Lectura 3	99.30	51.30
270 minutos	Lectura 1	98.75	38.73
	Lectura 2	98.75	40.26
	Lectura 3	98.75	37.19

Las pruebas de adsorción en columna con la broza de “café” presentan un porcentaje de remoción efectivo respecto al punto de ruptura que cada metal en remoción presente en la columna, siendo para plomo el punto de ruptura en el minuto 210 alcanzando una remoción promedio del 99.90% y para cadmio el punto de ruptura fue al minuto 120 alcanzando una remoción promedio del 97.20% para el método de preparación de Aparato Soxhlet.

Mientras que para el método de preparación de Cafetera Doméstica el plomo obtuvo un punto de ruptura en el minuto 210 alcanzando una remoción promedio del 99.47% y para cadmio el punto de ruptura al minuto 120 alcanzando una remoción promedio del 99.71%.

CAPITULO VI
CONCLUSIONES

6.0 CONCLUSIONES.

1. La revisión bibliográfica sobre la broza de “café”, constata la presencia de los siguientes metabolitos secundarios: Alcaloides, Flavonoides, Taninos, Triterpenos entre otros compuestos de interés de la broza de “café”.
2. En base a la bibliografía consultada se obtuvo información sobre las propiedades adsorbentes, su porosidad y características fisicoquímicas de la broza de “café” son las que intervienen mayoritariamente en el proceso de adsorción y eso se debe a que los Flavonoides, Alcaloides y Taninos nos permiten tener una capacidad de retener los metales pesados en su superficie y dejarlos adheridos a ella.
3. El tiempo de contacto de la solución de metales pesados y la broza de “café”, tiene una gran influencia en el proceso de biosorción. Ya que a medida que el tiempo transcurre la concentración de los metales combinados aumenta por lo cual la columna comienza a saturarse y se llega al tiempo de ruptura de los metales; este proceso fue constatado con las curvas de ruptura de cada metal siendo para plomo la saturación de la columna en el minuto 210 en ambos métodos de preparación, mientras que para cadmio fue en el minuto 120 en ambos métodos de preparación.
4. De acuerdo a los resultados obtenidos en los modelos de biosorción, el modelo que mejor se adapta al estudio realizado es la Isoterma de Langmuir, debido a su mejor relación lineal o Coeficiente de Correlación (R^2) y las Capacidades de Remoción q_{max} . La Isoterma de Langmuir presenta una cinética de segundo orden para la remoción de metales pesados en la broza de “café”.
5. Se evidencio que en los primeros minutos del proceso de biosorción en columna se presentan altas capacidades de captura de los metales pesados, pero con el paso del tiempo el material sorbente (broza de “café”) llega a un punto de saturación, dicho punto es conocido como Punto de Ruptura y nos permite la aplicación de los modelos matemáticos.

6. Con los datos obtenidos en el análisis estadístico ANOVA y la q_{\max} de cada modelo de biosorción en columna de cada metal pesados, el método de preparación de broza que mejor captó cadmio fue por Cafetera Doméstica y el que mejor captó plomo fue por Aparato Soxhlet.
7. Con el análisis estadístico ANOVA y el planteamiento de nuestra hipótesis nula (H_0) e hipótesis alternativa (H_a) mediante los datos obtenidos se estableció que existe una diferencia significativa entre los 2 métodos de preparación planteados en nuestro estudio, afirmamos que la absorción de cada metal depende mucho de la forma y las condiciones de preparación que se le da a la broza de “café”.
8. De acuerdo con las condiciones utilizadas en esta investigación y las capacidades de remoción de otros materiales biosorbentes, podemos afirmar que la broza de “café” es un buen material para ser un biofiltro, además de ser más efectivo para remover más plomo que cadmio de la solución de metales pesados combinados utilizada en nuestro análisis

CAPITULO VII
RECOMENDACIONES

7.0 RECOMENDACIONES.

1. El estudio fitoquímico de la broza de “café” no fue realizado de manera experimental, sino, mediante una recopilación bibliográfica debido a la alerta sanitaria que en la actualidad nuestro país y el mundo experimenta, por lo cual se desarrolló mediante una búsqueda bibliográfica en la cual se consultaron diversos artículos científicos, tesis y las bases de datos internacionales y nacionales para realizar la investigación botánica que concierne a la broza de “café”, por lo que se recomienda realizar el análisis fitoquímico de forma experimental.
2. Analizar detalladamente la biosorción en columna de broza de “café” y los metales pesados en conjunto, ampliando los lapsos de tiempo desarrollando así una nueva curva de ruptura de mayor amplitud, así como un panorama detallado de dicho proceso.
3. Continuar con el estudio de biosorción con broza de “café” combinando con otro material de relleno, para mejorar la eficacia de captación de los metales pesados, aplicando condiciones diferentes a las aplicadas en nuestro análisis.
4. Dada la importancia de la Familia Rubiaceae y su amplia distribución a nivel nacional e internacional, se sugiere preservar y conservar la especie de la Familia Rubiaceae, ya que por medio de nuestro análisis damos a conocer que la broza de “café” es muy útil para la remoción de metales pesados (cadmio y plomo) procedentes de aguas residuales de desecho.
5. Aunque existen usos simples que por la peligrosidad de dichos metales no es recomendado sin los cuidados necesarios, se podría utilizar como: antidetonantes de gasolina en gasolineras o en la preparación de pinturas. Además, se podría utilizar la broza de “café” contaminada con plomo y cadmio como material de relleno en la fabricación de compartimientos anti radioactivos o en construcciones de cuartos para contener la radiación.

BIBLIOGRAFIA.

1. Agency, E. M. (2019). Guideline for elemental impurities Q3D(R1)., 31(March).
2. Alhogbi, B. (2017). Potential of coffee husk biomass waste for the adsorption of Pb(II) ion from aqueous solutions. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 6(May), 21–25.
3. Araujo, C. (2010). Cuantificación de Plomo, Mercurio, y Cadmio en el agua de consumo humano de cinco comunidades de El Salvador por espectrofotometría de absorción atómica. Universidad de El Salvador. Facultad de Química y Farmacia.
4. Arceo, E., Díaz, J. (2018). Daño renal asociado a metales pesados., 5(1), 43–53.
5. Asociación Cafetalera de El Salvador. (2000). Monografía del café, dos siglos de historia en la caficultura salvadoreña. San Salvador. El Salvador.: Imprenta Criterio.
6. Azouaou, N., Sadaoui, Z., Djaafri, A., Mokaddem, H. (2010). Adsorption of cadmium from aqueous solution onto untreated coffee grounds: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Journal of Hazardous Materials*, 184(1–3), 126–134.
7. Barón, L. (2014). Evaluación de la cascarilla de café como material adsorbente para la remoción de iones Plomo Pb^{+2} presente en soluciones acuosas. Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Ambiental.
8. Berhe, S., Ayele, D., Tadesse, A., & Mulu, A. (2015). Adsorption efficiency of Coffee Husk for removal of Lead (II) from industrial effluents: equilibrium and kinetic study. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(9), 1–8.
9. Bermejo, D. (2016). Remoción de Plomo y Cadmio presente en aguas residuales mineras mediante biosorción en columnas con bagazo de Caña y Cáscara de Cacao. Universidad de Cuenca. Facultad de Ciencias Químicas. CarreadeIngenieríaAmbiental. Recuperadode:<http://dspace.ucu enca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/25710/1/Tesis.pdf>
10. Bustamante, E. (2011). Adsorción de metales pesados en residuos de Café modificados químicamente. Recuperadode<http://eprints.uanl.mx/2323/1/1080223849.pdf>
11. Cabañas, M., de la luz, M., Lamothe, A., Suarez, D., Dominguez, Y. (2005).

Prácticas de Botánica. Morfológica y sistemática.

12. Carvajal, E., Marulanda, L. (2020). Uso de residuos de café como biosorbente para la remoción de metales pesados en aguas residuales. *Ingenierías USBMed*, 11(1), 44–55.
13. Chacaltana, G. (2018). Uso de borra de café como biadsorbente para la remoción de Cadmio y Plomo disuelto en el agua del Río Añasamayo Sector La Perla-Huaral. Universidad César Vallejo. Facultad de Ingeniería. Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental Lima-Perú.
14. Cherdchoo, W., Nithettham, S., & Charoenpanich, J. (2019). Removal of Cr(VI) from synthetic wastewater by adsorption onto coffee ground and mixed waste tea. *Chemosphere*, 221, 758–767.
15. CONACYT. (2009). Norma Salvadoreña Obligatorio NSO 1:06 Agua. Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor. 1, 17. Recuperado de: <http://www.marn.gob.sv/descarga/norma-aguas-residuales-descargadas-a-cuerpo-receptor-nso-13-49-01-09/?wpdmdl=23913>
16. Concepción, N. y Méndez, M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico, y talio). *Archivos de Neurociencias*.
17. Consejo salvadoreño del café. (2019). Historia del Café. Disponible en: www.csc.gob.sv/historia
18. Consejo salvadoreño del café. (2019). Variedades de Café. Disponible en: www.csc.gob.sv/variedades
19. Consejo salvadoreño del café. (2020). Mapa de Producción cafetalera. Disponible en: www.csc.gob.sv/cordilleras
20. Cordero, J. (2015). Fitorremediación in Situ para la Recuperación de suelos contaminados por metales pesados (Plomo y Cadmio) y Evaluación de Selenio en la Finca Furatena Alta en el Municipio de Útica (Cundinamarca)., 13–43.
21. Coste, R. (1954). Cafetos y cafés en el mundo. (T. de I. G. S. y B. Hnos, Ed.) (Tomo I). Barcelona, España.
22. Crozier, A., Ashihara, H., Barbéran, F. (n.d.-v). Teas, cocoa and coffee. *Plant secondary metabolites and health*. 2012.
23. Cubides, P., & Ramírez, J. (2014). Adsorción de Cr (VI) sobre residuos de café. *Ingeniería Química y Ambiental*, 4(2), 18–25.
24. Davila, N. (2011). Caracterización de proceso de biosorción de metales pesados mediante residuos de café. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Químicas. México.
25. Dutta, A., Diao, Y., Jain, R., & Rene, E., Dutta, S. (2016). Adsorption of

Cadmium from aqueous solutions onto Coffee grounds and wheat straw: equilibrium and kinetic study. *Journal of Environmental Engineering*, 142(9), 1–6.

26. Farrag, H., Al-Sodany, Y., Otiby, F. (2013). Phytoremediation and accumulation characteristics of heavy metals by some plants in wadi Alargy-Wetland. *World Applied Sciences Journal*, 28(5), 644–653.
27. Ferrer, A. (2003). Intoxicación por metales. Análisis del sistema sanitario de Navarra. Universidad para la cooperación internacional. Costa Rica (Trabajo de graduación).
28. Fundación para el desarrollo socioeconómico y restauración ambiental. (2019). Tipos de variedades de café. Disponible en: www.fundesyram.info/biblioteca.php
29. Herbario del Museo de Historia Natural de El Salvador, P. S. H. (2020). Familia Rubiaceae. Disponible en: www.cultura.gob.sv/el-herbario-nacional-de-el-salvador
30. Hernández, M., Rivas, H., Ventura, G. (2017). Evaluación de la efectividad de la semilla de Teberinto (*Moringa oleífera Lam*) como método de remoción de arsénico y plomo en agua para consumo humano. Universidad de El Salvador. Facultad de Ciencias Agrícolas.
31. Hernández, A. (2016). “Efecto de los productos de la fermentación colónica in vitro del residuo sólido de café (*Coffea arabica* L.) usado, tostado francés, sobre la supervivencia de células de cáncer de colon humano”. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Química. Programa de Posgrado en Alimentos del Centro de la República.
32. Hidalgo, S. (2017). Reutilización de residuos de rapa para la eliminación de metales tóxicos en efluentes líquidos., (January 2004).
33. Huanca, M. (2018). Evaluación física del grano de café (*Coffea arabica* L) en diferentes tipos de tueste y la calidad sensorial, en taza destinada a diferentes mercados. Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de Agronomía. Unidad de Posgrado. Maestría en Producción Vegetal.
34. Ibarra, A., Campos, U., Rivera, F. (2001). Hacia la gestión sustentable del Agua en El Salvador. Propuestas básicas para elaborar una política nacional hídrica., 1–85.
35. Jaramillo, C., Patiño, C. (2014). Sistema de biosorción de metales pesados de los lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda de la Ciudad de Manizales., 111.
36. JIS, J. I. S. (1993). City water method edition by Japan Waterworks

Association. Testing methods for industrial waste water., 102.

37. Kaikake, K., Hoaki, K., Sunada, H., Dhakal, R., Baba, Y. (2007). Removal characteristics of metal ions using degreased coffee beans: Adsorption equilibrium of cadmium(II). *Bioresource Technology*, 98(15), 2787–2791.
38. Kumar, N. (2013). Modelación matemática del proceso de biosorción de Cromo⁺⁶ y Ni⁺²: estudios en serie en columnas de lecho fijo con Bagazo de Caña de Azúcar. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas.
39. Landaverde, V., López, A., Vásquez, T. (2002). Estudio de inducción a callo embriogénico en variedades comerciales de café (*Coffea arabica*) de El Salvador. Facultad de Ciencias Agronómicas. Departamento de Fitotecnia.
40. Lara, J., Tejada, C., Villabona, A., Arrieta, A., Conde, C. (2016). Adsorción de plomo y cadmio en sistema continuo de lecho fijo sobre residuos de cacao., 29(2), 113–124.
41. León, J. (1987). Botánica de los cultivos tropicales. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
42. Limo, U. (2003). Estudio sobre la presencia del plomo. Medioambiente de Talara. Perú.
43. Limo, U. (2003). Fundamentos teóricos de plomo Version III. Medioambiente de Talara. Perú.
44. López, J., Contreras, E. (2017). Estudio de factibilidad del uso de la fitorremediación como alternativa para la remoción de metales pesados en el suelo usado como botadero a cielo abierto en Utopía-Yopal. Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Bogotá, Colombia.
45. López, C. (2013). Elaboración de una colección de referencias y fortalecimiento de la información botánica y farmacognóstica de 31 especies de plantas utilizadas en la elaboración de medicina natural. Universidad de El Salvador. Facultad de Química y Farmacia. El Salvador.
46. López, E. (2007). Extracción de aceite de café. *Revista Ingeniería e Investigación*, 27(1), 25–31.
47. Martín, M. (2008). Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados.
48. Martínez, S., Hernández, F., Aguilar, C., Rodríguez, R. Extractos de pulpa de Café: una revisión sobre antioxidantes polifenólicos y su actividad antimicrobiana. Recuperado de: redalyc.org/jatsRepo/674/67459697009/html/index.html

49. Mejía, G. (2006). Aproximación teórica a la biosorción de metales pesados por medio de microorganismos., (1), 77–99.
50. Minamisawa, M., Minamisawa, H., Yoshida, S., Takai, N. (2004). Adsorption behavior of heavyon biomaterials. Polish Journal of Environmental Studies, 23(3), 853–865.
51. Molina, E. (2018). Evaluación de la actividad Nootrópica del extracto de la pulpa del Café Arabica (*Coffea arabica*). Director. Universidad Central del Ecuador. Quito. Facultad de Ciencias Químicas. Carrera Química Farmacéutica.
52. Monroy, R. (2019). Remoción Plomo Pb (II) de soluciones acuosas y aguas residuales de mina, por adsorción, floculación- sedimentacion de flujo ascendente BATCH utilizando Chacko (*Hidralgirita*) y Cal (CaO). Tesis. Universidad Nacional del Altiplano. Puno- Perú. Facultad de Ingeniería Química. Escuela Profesional de Ingeniería Química. Recuperado de: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/11856>
53. Mora, N., Pastrana, J., Lagos, Y., & Lozada, J. (2018). Evaluation of mercury (Hg²⁺) adsorption capacity using exhausted coffee waste. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 10(June), 60–70.
54. Muñoz, N. (2016). Determinación de Plomo y Cadmio en hierbas medicinales.
55. Naranjo, M., Vélez, L., Rojano, B. (2011). Actividad antioxidante de café colombiano de diferentes calidades. Revista Cubana de Plantas Medicinales, 16(2), 164–173. Recuperado de: <http://scielo.sld.cu>
56. Nuñez, S., Huaraca, C. (2018). Cuantificación de Plomo, Cadmio y Arsénico en granos de cacao y café de la zona de Jaen-Cajamarca durante el periodo de Febrero a Junio 2018. Universidad Norbert Wiener. Facultad de Farmacia y Bioquímica. Lima-Perú.
57. Olgúin, E., & Sánchez, G. (2011). Phytofiltration of Heavy Metals: Assessment of the Key Factors Involved in the Design of a Sustainable Process. Comprehensive Biotechnology, Second Edition, 6, 207–213.
58. Oliveira, W., Franca, A., Oliveira, L., Rocha, S. (2008). Untreated coffee husks as biosorbents for the removal of heavy metals from aqueous solutions. Journal of Hazardous Materials, 152(3), 1073–1081.
59. Orjuela, A., Colmenares, J., Viveros, L. (2017). Remoción de cromo hexavalente de soluciones acuosas usando cáscara de yuca (*Manihot esculenta*): Experimentos en columna. Inge Cuc, 13(1), 42–52.
60. Pacheco, T. (2013). Estudio químico de residuos de Café (*Coffea arábica*)

como base científica para determinar su potencial uso en productos con valor agregado.

61. Park, M. H., Jeong, S., Lee, G., Park, H., & Kim, J. Y. (2019). Removal of aqueous-phase Pb(II), Cd(II), As(III), and As(V) by nanoscale zero-valent iron supported on exhausted coffee grounds. *Waste Management*, 92, 49–58.
62. Patrón, M. (2012). Factibilidad del uso de un sistema de flujo continuo para la remoción de iones Cadmio y Cobre de soluciones acuosas utilizando El Alga *Sargassum sinicola*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste, S.C.
63. PROCAFE. (1997). Boletín Estadístico de la Caficultura Salvadoreña. Fundación Salvadoreña Para La Investigación Del Café., 1–20.
64. Puerta, G. (2011). Composición química de una taza de café.
65. Pulford, I., Watson, C. (2003). Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees - A review. *Environment International*, 29(4), 529–540.
66. Richard, C. (2009). Espectroscopia de emisión y absorción atómica. Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Químicas, México.
67. Rocha, E. (2000). Espectrometría de absorción atómica. Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Químicas. Editorial UACH, México.
68. Rojo, E. (2014). Café I (*G. Coffea*), 7(2), 113–132.
69. Rugerio, L. (2017). Cuantificación de Antioxidantes contenidos en el Café (*Coffeaa Arabica*) verde y tostado procedente de Veracruz.
70. Tejada, C., Gallo, J., Moscote, J., Villabona, A., Acevedo, D. (2018). Adsorción competitiva de Plomo y Niquel sobre cáscara de ñame y bagazo de palma en sistema continuo. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 16(1), 52.
71. Tejada, C., Villabona, A., Garcés, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico., 18(34), 109–123.
72. Toribio, E. (2015). Estudio de la capacidad de los hidroxapatitos como reactivos para la eliminación de metales., 1–89.
73. Tropicos.com. (2009). Descripción Botánica de la Familia Rubiaceae. Disponible en: www.tropicos.org/Name
74. Truque, P. (2003). Armonización de los estándares de agua potable en las Américas. Organization of American States. Department of Sustainable

Development.

75. Utomo, H., Hunter, K. (2006). Adsorption of heavy metals by exhausted coffee grounds as a potential treatment method for waste waters. *Journal of Surface Science and Nanotechnology*, 4(June 2016), 504–506.
76. Vera, L., Bermejo, D., Uguña, M.F., García, N., Flores, M., Brazales, D. (2017). Biosorción de Cd (II) y Pb (II) en columna de lecho fijo con cáscara de Cacao., (li).

GLOSARIO

-Absorción: Es el paso de sustancia a través de la membrana celular, o tejidos especializados, del medio ambiente externo al medio interno (intracelular o extracelular) de un organismo vivo.(62)

-Adsorción: Es la incorporación de sustancias gaseosas, vapores o cuerpos disueltos en la superficie externa de un sólido o un líquido.(62)

-Bioacumulación: Aumento progresivo de la cantidad de una sustancia en un organismo o parte de él, como consecuencia de que el ritmo de absorción supera la capacidad del organismo para eliminar la sustancia.(62)

-Biomasa: Es un conjunto de materia orgánica que se caracteriza tanto por su origen (vegetal o animal) como por su naturaleza.(12)

-Biosorción o Bioadsorción: Fenómeno de captación pasiva de sustancia y compuesto de diversa naturaleza química presentes en disoluciones acuosas.(24)

-Biosorbente: Es la propiedad de ciertas biomoléculas para fijar y concentrar iones (como metales traza) u otras moléculas de soluciones acuosas.(62)

-Cadmio: Es un metal pesado de símbolo Cd, que se encuentra de forma natural en las rocas y suelos.(10)

-Cinética de adsorción: Es el proceso de adsorción, las moléculas de adsorbato se difunden sobre las partículas del adsorbente.(12)

-Concentración tóxica: Es la concentración de una sustancia en el órgano crítico a la que en un porcentaje específico de la población expuesta ha alcanzado la concentración crítica.(24)

-Diálisis: Es el proceso de separar las moléculas en una solución por la diferencia en sus índices de difusión o presión osmótica a través de membrana semipermeable.(24)

-Espectrometría de Absorción Atómica: Es una técnica para la determinar la concentración de un elemento metálico determinado en una muestra, puede utilizarse para analizar la concentración de más de 62 metales diferentes en una solución.(10)

-Intercambio iónico: Es la transferencia de uno o más iones de la fase fluida al sólido por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales.⁽⁶²⁾

-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 como una función del material presente en la fase gas o en la disolución.⁽¹²⁾

-Nefropatía: Es la enfermedad del riñón, cuando los riñones fallan, pierden su capacidad de filtrar los productos de desecho.⁽²⁴⁾

-pH: Es un parámetro fisicoquímico que expresa la presencia de iones Hidrogeno en una solución.⁽¹⁰⁾

-Plomo: Es un elemento químico del grupo denominado “metales pesados” que posee el símbolo Pb.⁽¹⁰⁾

-Precipitación: Se asocia a un mecanismo de defensa de algunos microorganismos, los cuales pueden producir sustancias que precipitan los elementos tóxicos acumulados en su interior o en el medio que los rodea.⁽²⁴⁾

-Precipitación química: Es la eliminación de un ion metálico disuelto, por la adición de un reactivo que forme un compuesto insoluble con el mismo.⁽¹⁰⁾

-Remoción: Es un proceso en el cual las partículas son separadas de un objeto sólido sin acción mecánica. También se conoce como proceso fisicoquímico.⁽¹²⁾

-Residuo de Café (broza de café): Es un subproducto de la preparación de café, se separa por filtración en las preparaciones tanto hogareñas como industriales.⁽¹²⁾

-Residuo orgánico: Es aquel desecho derivado de un proceso productivo y del consumo de bienes y servicios que no necesariamente tiene un valor económico para quien lo genera.⁽¹²⁾

-Sorbente: Es aquel material que posee la propiedad de fijar y concentrar iones (como metales trazas) u otras moléculas de soluciones acuosas.⁽⁶²⁾

-Sorci3n: Es la retenci3n de una sustancia por otra cuando est3n en contacto; incluyendo las operaciones de absorci3n, adsorci3n, intercambio i3nico y di3lisis.⁽¹⁰⁾

-Sustancia qu3mica: Es una clase particular de materia homog3nea cuya composici3n es fija y qu3micamente definida.⁽¹⁰⁾

ANEXOS

ANEXO N°1

**NORMA SALVADOREÑA OFICIAL NSO 13.49.01:09 AGUA. AGUAS
RESIDUALES DESCARGAS A UN CUERPO RECEPTOR.**

NORMA
13.49.01:09

NSO



SALVADOREÑA

AGUA.

AGUAS RESIDUALES DESCARGADAS A UN CUERPO RECEPTOR.

CORRESPONDENCIA: Esta norma es una adaptación de la Propuesta de Norma de Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor. Ministerio de Salud, El Salvador. Octubre de 1996.

ICS 13.060

Tabla N°3. Parámetros Complementarios sobre Valores Permisibles para Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor NSO 13.49.01:09.

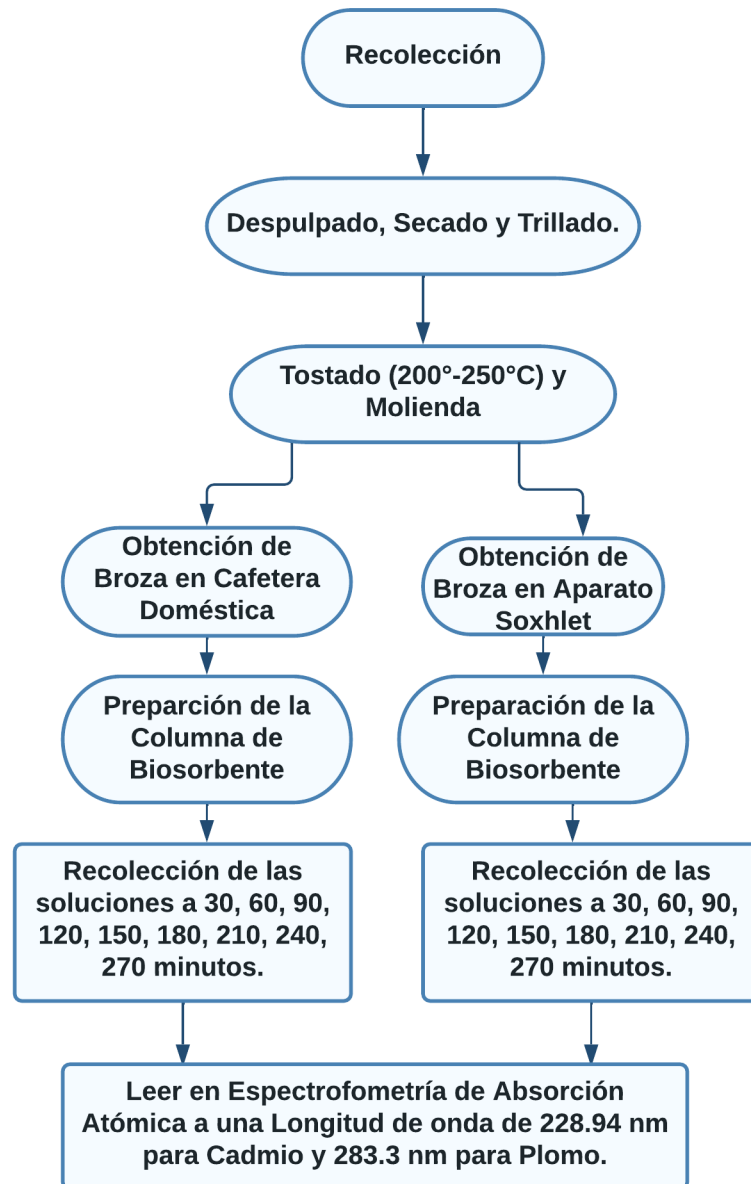
Parámetros	Valores máximos permisibles
Aluminio (Al)	mg/l 5
Arsénico (As)	mg/l 0,1
Bario total (Ba)	mg/l 5
Berilio (Be)	mg/l 0,5
Boro (B)	mg/l 1,5
Cadmio (Cd)	mg/l 0,1
Cianuro total (CN ⁻)	mg/l 0,5
Cinc (Zn)	mg/l 5
Cobalto (Co)	mg/l 0,05
Cobre (Cu)	mg/l 1
Coliformes fecales	NMP/100ml 2 000
Coliformes totales	NMP/100ml 10 000
Color	1)
Compuestos fenólicos sintéticos	mg/l 0.5
Cromo hexavalente (Cr ⁺⁶)	mg/l 0,1
Cromo total (Cr)	mg/l 1
Detergentes (SAAM)	mg/l 10
Fluoruros (F)	mg/l 5
Fósforo total (P)	mg/l 15
Organofluorina	mg/l 0,1
Fosfatina	mg/l 0,1
Benzimidazol	mg/l 0,1
Piretroides	mg/l 0,1
Bipiridilos	mg/l 0,1
Fenoxi	mg/l 0,1
Triazina	mg/l 0,1
Fosfónico	mg/l 0,1
Hierro total (Fe)	mg/l 10
Litio (Li)	mg/l 2

Tabla N° 3. Continuación

Parámetros		Valores máximos permisibles
Manganeso total (Mn)	mg/l	2
Materiales flotantes	mg/l	Ausentes
Mercurio (Hg)	mg/l	0,01
Molibdeno (Mo)	mg/l	0,1
Níquel (Ni)	mg/l	0,2
Nitrógeno total (N)	mg/l	50
Organoclorados	mg/l	0,05
Organofosforados y Carbamatos	mg/l	0,1
pH	Unidades	5,5 – 9,0 ²⁾
Plata (Ag)	mg/l	0,2
Plomo (Pb)	mg/l	0,4
Selenio (Se)	mg/l	0,05
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/l	1000
Sustancias radiactivas	-	0
Temperatura	C	20-35°C ³⁾
Turbidez (Turbiedad)	NTU	4)
Vanadio (V)	mg/l	1

ANEXO N°2

ESQUEMA DE TRABAJO GENERAL.



FiguraN°10. Esquema de Trabajo General

ANEXO N°3

ESCALA DE TAMICES ESTÁNDAR TYLER.

Tabla N°13. Escala de Tamices de Tyler

APÉNDICE 5

Escala de tamices estándar Tyler

Esta escala de tamices está basada en una abertura de 0.0029 in., que es la abertura del tamiz estándar de 200 mallas y 0.0021 in. de diámetro de alambre, tal como ha sido adoptada por el National Bureau of Standard.

Mallas	Abertura efectiva, in.	Abertura efectiva, mm	Abertura aproximada, in.	Diámetro del alambre, in.
	1.050	26.67	1	0.148
†	0.883	22.43	2	0.135
	0.742	18.85	3	0.135
†	0.624	15.85	4	0.120
	0.525	13.33	5	0.105
†	0.441	11.20	6	0.105
	0.371	9.423	7	0.092
2½†	0.312	7.925	8	0.088
3	0.263	6.680	10	0.070
3½†	0.221	5.613	14	0.065
4	0.185	4.699	16	0.065
5†	0.156	3.962	20	0.044
6	0.131	3.327	25	0.036
7†	0.110	2.794	30	0.0328
8	0.093	2.362	35	0.032
9†	0.078	1.981	40	0.033
10	0.065	1.651	45	0.035
12†	0.055	1.397	50	0.028
14	0.046	1.168	60	0.025
16†	0.0390	0.991	70	0.0235
20	0.0328	0.833	80	0.0172
24†	0.0276	0.701	100	0.0141
28	0.0232	0.589		0.0125
32†	0.0195	0.495		0.0118
35	0.0164	0.417	1/64 (Ninguna)	0.0122
42†	0.0138	0.351		0.0100
48	0.0116	0.295		0.0092
60†	0.0097	0.246		0.0070
65	0.0082	0.208		0.0072
80†	0.0069	0.175		0.0056
100	0.0058	0.147		0.0042
115†	0.0049	0.124		0.0038
150	0.0041	0.104		0.0026
170†	0.0035	0.088		0.0024
200	0.0029	0.074		0.0021
270	0.0021	0.053		
325	0.0017	0.044		

†Estos tamices se incluyen cuando se desea un intervalo de tamizado más estrecho, completando la serie estándar utilizada habitualmente. Con esta inclusión, la relación de los diámetros de las aberturas entre dos tamices sucesivos es de $1:\sqrt{2}$ en vez de $1:\sqrt{3}$.

ANEXO N°4.

PREPARACIÓN DE SOLUCIONES PARA pH.

PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE SODIO 1M.

1. Pesar 4 g de NaOH en un beaker de 50 mL.
2. Agregar 25 mL de agua bidestilada y agitar hasta disolver.
3. Transferir el contenido a un balón volumétrico de 100 mL
4. Realizar tres lavados de 5 mL con agua bidestilada y recibirlos en el balón de 100 mL.
5. Agitar el balón volumétrico para homogenizar la solución.
6. Aforar el balón con agua bidestilada por medio de una pizeta y agitar nuevamente para homogenizar la solución.

PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE ÁCIDO NÍTRICO AL 10%.

1. Medir 2.80 mL con una pipeta volumétrica y transferir a un balón volumétrico de 25 mL.
2. Agregar 10 mL de agua bidestilada al balón de 25 mL.
3. Agitar el balón volumétrico para homogenizar la solución y luego aforar el balón con ayuda de una pizeta y agitar nuevamente para homogenizar la solución.

ANEXO N°5

**PROCEDIMIENTO DE LECTURA DE PLOMO Y PREPARACION DE
SOLUCIONES ESTÁNDAR DE PLOMO.**

Procedimiento de la lectura de las muestras de plomo.⁽³⁶⁾

1. Tomar 100.0 mL de muestra, medidos volumétricamente y transferir a un beaker de 250 mL.
2. Agregar HCl concentrado (al 5% con respecto a la cantidad de la muestra obtenida).
3. Si la muestra posee sólidos de en suspensión de broza de “café” se deberá adicionar HNO_3 en igual proporción al HCl.
4. Llevar a ebullición durante 10 minutos, manteniendo el cuidado de no tener pérdidas por salpicaduras.
5. Filtrar la solución utilizando papel filtro Whatman N°42 y recibir en un balón volumétrico de 100 mL.
6. Realizar de 2 a 3 lavados con un beaker para arrastrar el contenido restante del balón.
7. Aforar con agua bidestilada con la ayuda de una pizeta, rotular y conservar la solución para la determinación de plomo.
8. Preparar el blanco de la misma forma en que se prepara la muestra utilizando agua bidestilada en igual cantidad que la muestra. El valor que se obtenga del blanco será utilizado para la corrección en la medición de la muestra.
9. Preparar una curva de calibración de estándares de 0.2, 0.5, 3.0 y 5.0 ppm de plomo partiendo de una solución stock de 100 ppm de plomo.

Preparación de las soluciones estándar.⁽³⁶⁾

Preparación de la solución stock de plomo de 1000 ppm.

1. Preparar una solución stock de 100 ppm de Pb partiendo de una solución de 1000 ppm de Pb.
2. En un balón volumétrico de 200.0 mL adicionar de la solución de 1000 ppm, llevar a volumen con agua bidestilada.

Preparación de las soluciones estándar Individuales:

-Estándar de 0.2 ppm de plomo: partiendo del estándar de 100 ppm de Pb; se toma una alícuota de 0.2 mL y se depositan en un balón de 100.0 mL, se

agregarán 25 mL de agua bidestilada y se adicionarán 5 mL de HCl concentrado (calidad AA).

-Llevar a volumen con agua bidestilada.

-Homogenizar y rotular (Guardar en refrigeración, tiempo máximo 6 meses).

-Estándar de 0.5 ppm de plomo: partiendo del estándar de 100 ppm de Pb; se toma una alícuota de 0.5 mL y se depositan en un balón de 100.0 mL, se agregarán 25 mL de agua bidestilada y se adicionarán 5 mL de HCl concentrado (calidad AA).

-Llevar a volumen con agua bidestilada.

-Homogenizar y rotular (Guardar en refrigeración, tiempo máximo 6 meses).

-Estándar de 3.0 ppm de plomo: partiendo del estándar de 100 ppm de Pb; se toma una alícuota de 3.0 mL y se depositan en un balón de 100.0 mL, se agregarán 25 mL de agua bidestilada y se adicionarán 5 mL de HCl concentrado (calidad AA).

-Llevar a volumen con agua bidestilada.

-Homogenizar y rotular (Guardar en refrigeración, tiempo máximo 6 meses).

-Estándar de 5.0 ppm de plomo: partiendo del estándar de 100 ppm de Pb; se toma una alícuota de 5.0 mL y se depositan en un balón de 100.0 mL, se agregarán 25 mL de agua bidestilada y se adicionarán 5 mL de HCl concentrado (calidad AA).

-Llevar a volumen con agua bidestilada

ANEXO N°6

**PROCEDIMIENTO DE LECTURA DE CADMIO Y PREPARACION DE
SOLUCIONES ESTÁNDAR DE CADMIO.**

Procedimiento de la lectura de las muestras de cadmio.⁽⁴⁵⁾

1. Tomar 100.0 mL de muestra, medidos volumétricamente y transferir a un beaker de 250 mL.
2. Agregar HCl concentrado (al 5% con respecto a la cantidad de la muestra obtenida).
3. Si la muestra posee sólidos de en suspensión de broza de “café” se deberá adicionar HNO_3 en igual proporción al HCl.
4. Llevar a ebullición durante 10 minutos, manteniendo el cuidado de no tener pérdidas por salpicaduras.
5. Filtrar la solución utilizando papel filtro Whatman N°42 y recibir en un balón volumétrico de 100 mL.
6. Realizar de 2 a 3 lavados con un beaker para arrastrar el contenido restante del balón.
7. Aforar con agua bidestilada con la ayuda de una pizeta, rotular y conservar la solución para la determinación de cadmio.
8. Preparar el blanco de la misma forma en que se prepara la muestra utilizando agua bidestilada en igual cantidad que la muestra. El valor que se obtenga del blanco será utilizado para la corrección en la medición de la muestra.
9. Preparar una curva de calibración de estándares de 0.25, 0.5, 1.0 y 2.0 ppm de cadmio partiendo de una solución stock de 100 ppm de cadmio.

Preparación de las soluciones estándar.⁽⁴⁵⁾

Preparación de la solución stock de cadmio de 1000 ppm.

1. Preparar una solución stock de 100 ppm de Cd partiendo de una solución de 1000 ppm de Cd.
2. En un balón volumétrico de 200.0 mL adicionar de la solución de 1000 ppm, llevar a volumen con agua bidestilada.

Preparación de las soluciones estándar Individuales:

-Estándar de 0.25 ppm de cadmio: partiendo del estándar de 100 ppm de Cd; se toma una alícuota de 0.25 mL y se depositan en un balón de 100.0 mL, se agregarán 25 mL de agua bidestilada y se adicionarán 5 mL de HCl concentrado (calidad AA).

-Llevar a volumen con agua bidestilada.

-Homogenizar y rotular (Guardar en refrigeración, tiempo máximo 6 meses).

-Estándar de 0.5 ppm de cadmio: partiendo del estándar de 100 ppm de Cd; se toma una alícuota de 0.5 mL y se depositan en un balón de 100.0 mL, se agregarán 25 mL de agua bidestilada y se adicionarán 5 mL de HCl concentrado (calidad AA).

-Llevar a volumen con agua bidestilada.

-Homogenizar y rotular (Guardar en refrigeración, tiempo máximo 6 meses).

-Estándar de 1.0 ppm de cadmio: partiendo del estándar de 100 ppm de Cd; se toma una alícuota de 1.0 mL y se depositan en un balón de 100.0 mL, se agregarán 25 mL de agua bidestilada y se adicionarán 5 mL de HCl concentrado (calidad AA).

-Llevar a volumen con agua bidestilada.

-Homogenizar y rotular (Guardar en refrigeración, tiempo máximo 6 meses).

-Estándar de 2.0 ppm de cadmio: partiendo del estándar de 100 ppm de Cd; se toma una alícuota de 2.0 mL y se depositan en un balón de 100.0 mL, se agregarán 25 mL de agua bidestilada y se adicionarán 5 mL de HCl concentrado (calidad AA).

-Llevar a volumen con agua bidestilada.

-Homogenizar y rotular (Guardar en refrigeración, tiempo máximo 6 meses).

ANEXO N°7

**MUSEO DE HISTORIA NATURAL DE EL SALVADOR, PARQUE SABURO
HIRAO**



Figura N°11. Museo de Historia Natural de El Salvador, Parque Saburo Hirao.

ANEXO N° 8

CONSTANCIA DE IDENTIFICACION DE LA ESPECIE VEGETAL *Coffea arabica*.



MINISTERIO
DE CULTURA

A quien interese
Presente.

Por este medio hago constar que la muestra recolectada en Finca El Zapote, caserío Caballero, cantón El Gramal del municipio de La Palma, departamento de Chalatenango a una Latitud de 14° 18' 33", Longitud: 89° 15' 8" 45", a una Altitud de 11340 m snm en fecha 11 de mayo de 2021. Planta conocida como "café", que se caracteriza por sus flores blancas y sus frutos drupas, rojos, cultivado en gran escala. Con esta información y al observar la muestra se determina que pertenece a la especie ***Coffea arabica* L.**, pertenece a la familia **Rubiaceae**, la cuál ha sido depositada en la colección nacional del herbario MHES del Museo de Historia Natural de El Salvador con el Voucher J Menjivar y K Contreras 5206.

Para los usos que estime conveniente se extiende la presente constancia de identificación de muestra botánica a los 09 días de julio del año 2021.

F.  

Licda. Jenny Menjivar
Curadora Herbario MHES
Coordinadora Colecciones de Historia Natural MUHNES.

ANEXO N°9

MAPA GEOGRÁFICO DE PRODUCCION DE CAFÉ DEN EL SALVADOR,



Figura N°12. Mapa Geográfico de producción de “café” en El Salvador.

ANEXO N°10

**FOTOGRAFÍAS DE LA BIOSORCIÓN EN COLUMNA DE PLOMO Y CADMIO
CON BROZA DE “CAFÉ”.**

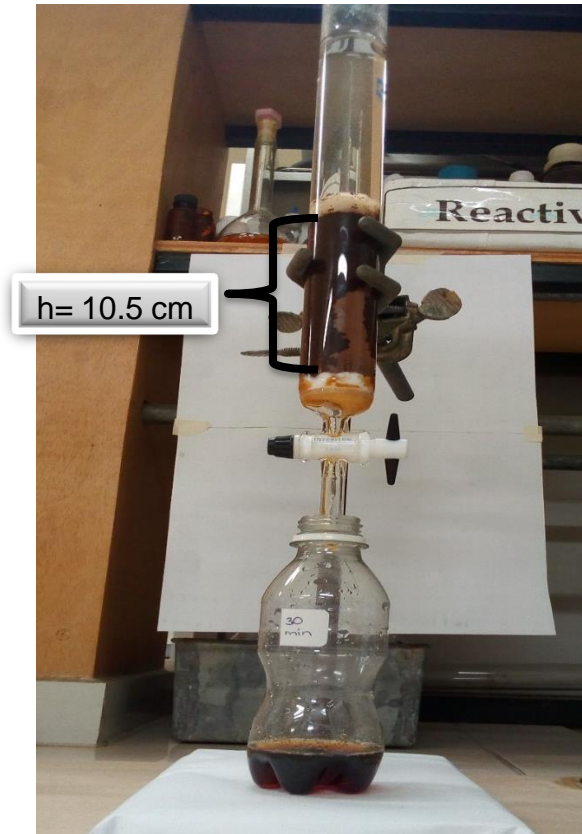


Figura N°13. Biosorción en columna de la broza de “café” preparada en Aparato Soxhlet.

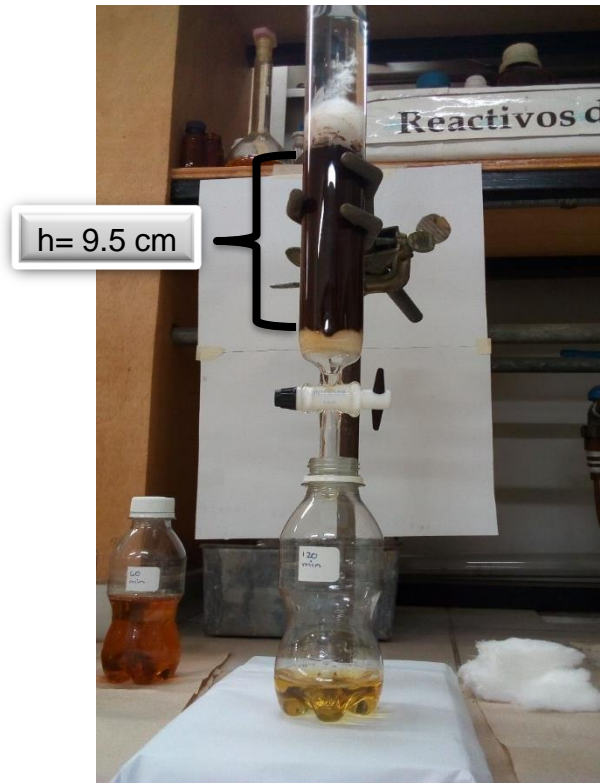


Figura N°14. Biosorción en columna de la broza de “café” preparada en Cafetera Doméstica

ANEXO N°11

**RESULTADOS DE ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA
PARA PLOMO Y CADMIO**



RESULTADOS DE ANÁLISIS

Fecha de Emisión: Ciudad Universitaria, 8 de noviembre 2019.

Tipo de Muestras: AGUA

Análisis solicitado: Plomo y Cadmio

Usuario: Br. Teresa del Carmen Contreras Martínez

Muestra		Metodología	
ID interno	Id Usuario	Pb ppm	Cd ppm
MXU0282-2019	S-30	3.4644	8.3420
		3.4449	8.5960
		3.4840	8.4710
MXU0283-2019	S-60	<0.1	0.3094
		<0.1	0.3182
		<0.1	0.3140
MXU0284-2019	S-90	<0.1	0.0533
		<0.1	0.0533
		<0.1	0.0533
MXU0285-2019	S-120	<0.1	0.1722
		<0.1	0.1730
		<0.1	0.1726
MXU0286-2019	S-150	<0.1	2.1168
		<0.1	2.1757
		<0.1	2.1460
MXU0287-2019	S-180	<0.1	7.4610
		<0.1	7.6280
		<0.1	7.5450
MXU0288-2019	S-210	0.5424	18.4320
		0.5529	18.7780
		0.5522	18.6057
		0.7345	29.4110
MXU0289-2019	S-240	0.7350	28.5930
		0.7325	29.0020
		1.3013	36.4850
MXU0290-2019	S-270	1.3042	35.5720
		1.3027	37.4030

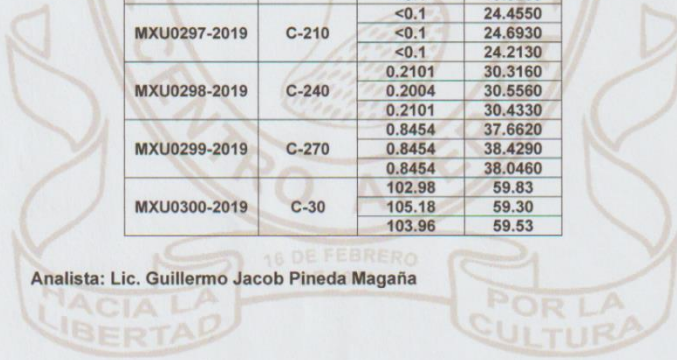


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA AGRÍCOLA



Metodología			
Muestra		Pb ppm	Cd ppm
ID interno	Id Usuario	AA-Llama	AA-Llama
MXU0291-2019	C-30	0.4447	0.8596
		0.4642	0.8479
		0.4545	0.8538
MXU0292-2019	C-60	<0.1	0.1726
		<0.1	0.1776
		<0.1	0.1751
MXU0293-2019	C-90	<0.1	0.1847
		<0.1	0.1901
		<0.1	0.1872
MXU0294-2019	C-120	<0.1	1.6488
		<0.1	1.6793
		<0.1	1.6638
MXU0295-2019	C-150	<0.1	4.9340
		<0.1	4.8210
		<0.1	4.8750
MXU0296-2019	C-180	<0.1	15.2581
		<0.1	14.7820
		<0.1	15.0200
MXU0297-2019	C-210	<0.1	24.4550
		<0.1	24.6930
		<0.1	24.2130
MXU0298-2019	C-240	0.2101	30.3160
		0.2004	30.5560
		0.2101	30.4330
MXU0299-2019	C-270	0.8454	37.6620
		0.8454	38.4290
		0.8454	38.0460
MXU0300-2019	C-30	102.98	59.83
		105.18	59.30
		103.96	59.53

Analista: Lic. Guillermo Jacob Pineda Magaña





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA AGRÍCOLA



"HACIA LA LIBERTAD POR LA CULTURA"

Lic. M.Sc. Freddy Alexander Carranza Estrada
Jefe del Departamento de Química Agrícola



ANEXO N°12
MATERIALES, CRISTALERIA Y REACTIVOS.

MATERIALES Y CRISTALERIA.

- Agitadores de vidrio.
- Algodón.
- Aro metálico.
- Balones volumétricos 25 mL, 50 mL, 100 mL, 100 mL, 5 L.
- Bandejas de acero inoxidable.
- Beaker 25 mL, 50 mL, 100 mL 1000 mL
- Bolsas plásticas de 1,2 y 5 lb.
- Botellas de polipropileno.
- Columna de vidrio de 3.2 cm de diámetro interno y 49 cm de altura.
- Embudo de vidrio.
- Espátula de plástico.
- Etiquetas de papel.
- Guantes.
- Papel filtro Whatman N° 42.
- Papel glassine.
- Papel toalla.
- Pinzas de sostén y de extensión.
- Pizeta.
- Probetas 25 mL, 50 mL, 100 mL, 1000 mL.
- Soporte metálico.
- Tamiz mesh 14.

EQUIPO.

- Aparato Soxhlet 1000 mL.
- Balanza analítica OHAUS EXPLORES (5 dígitos).
- Cafetera doméstica Windmere de capacidad de 12 onzas.
- Cámara de extracción de gases Fisher Hamilton.
- Destilador de agua.
- Estufa Thermo Scientific Heratherm OMH400.
- Espectrofotómetro de Absorción Atómica de Horno de grafito (Shimadzu) AA-700.
- pHmetro Ultra BASIC.

REACTIVOS UTILIZADOS PARA LA PREPARACION DE LA BROZA DE *Coffea arabica*.

- Agua bidestilada de pH 4.0 y conductividad de $8\mu\text{S}/\text{cm}^3$
- *Coffea arabica*, Variedad Pacas.
- *n*-hexano.

REACTIVOS UTILIZADOS PARA LA PREPARACION DE LA SOLUCIÓN ESTÁNDAR DE 100 ppm DE PLOMO Y 60 ppm DE CADMIO.

- Agua bidestilada de pH 4.0 y conductividad de $8\mu\text{S}/\text{cm}^3$.
- Nitrato de cadmio tetrahidratado.
- Nitrato de plomo.

REACTIVOS UTILIZADOS PARA LA DETERMINACION DE pH.

- Agua bidestilada de pH 4.0 y conductividad de $8\mu\text{S}/\text{cm}^3$.
- Ácido nítrico.
- Hidróxido de sodio.
- Solución tampón pH 4, 7 y 10.

REACTIVOS UTILIZADOS EN LA LECTURA POR ESPECTROFOMETRIA DE ABSORCION ATOMICA.

- Ácido clorhídrico concentrado calidad AA.
- Ácido nítrico.
- Agua bidestilada de pH 4.0 y conductividad de $8\mu\text{S}/\text{cm}^3$.
- Estándares de 0.2, 0.50, 3.0 y 5.0 ppm de plomo.
- Estándares de 0.25, 0.50, 1.0 y 2.0 ppm de cadmio.