

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



BIOSORCIÓN DE CADMIO DISPONIBLE EN MEDIO ACUOSO MEDIANTE
CASCARILLA DE SEMILLA DE CACAO (*Theobroma cacao* L.)

Tesis

para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

ARELLANO MARTINEZ JHACKSON JENGLER

Asesor

Dr. PAREDES SALAZAR JOSÉ LUIS

Tingo María – Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°114-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 16 de setiembre de 2025, a horas 10:25 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“BIOSORCIÓN DE CADMIO DISPONIBLE EN MEDIO ACUOSO MEDIANTE
CASCARILLA DE SEMILLA DE CACAO (*Theobroma cacao* L.)”**

Presentado por el Bachiller: **ARELLANO MARTINEZ, JHACKSON JENGLER** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 21 de octubre de 2025

Dr. EDILBERTO CHUQUILIN BUSTAMANTE
PRESIDENTE

Ing. MSc. ABBY SOLANGE DA CRUZ RODRIGUEZ
MIEMBRO



Ing. MSc. SANDRA LORENA ZAVALA GUERRERO
MIEMBRO

Dr. JOSE LUIS PAREDES SALAZAR
ASESOR



UNAS

VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 387 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	<input checked="" type="checkbox"/>	Trabajo de Suficiencia Profesional	<input type="checkbox"/>
-------	-------------------------------------	------------------------------------	--------------------------

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
BIOSORCIÓN DE CADMIO DISPONIBLE EN MEDIO ACUOSO MEDIANTE CASCARILLA DE SEMILLA DE CACAO (<i>Theobroma cacao</i> L.)	ARELLANO MARTINEZ JHACKSON JENGLER	05 % Cinco	0 % Cero

Tingo María, 20 de noviembre de 2025.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo



UNAS

VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 387 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	<input checked="" type="checkbox"/>	Trabajo de Suficiencia Profesional	<input type="checkbox"/>
-------	-------------------------------------	------------------------------------	--------------------------

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
BIOSORCIÓN DE CADMIO DISPONIBLE EN MEDIO ACUOSO MEDIANTE CASCARILLA DE SEMILLA DE CACAO (<i>Theobroma cacao</i> L.)	ARELLANO MARTINEZ JHACKSON JENGLER	05 % Cinco	0 % Cero

Tingo María, 20 de noviembre de 2025.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo



UNAS

VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 387 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	<input checked="" type="checkbox"/>	Trabajo de Suficiencia Profesional	<input type="checkbox"/>
-------	-------------------------------------	------------------------------------	--------------------------

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
BIOSORCIÓN DE CADMIO DISPONIBLE EN MEDIO ACUOSO MEDIANTE CASCARILLA DE SEMILLA DE CACAO (<i>Theobroma cacao</i> L.)	ARELLANO MARTINEZ JHACKSON JENGLER	05 % Cinco	0 % Cero

Tingo María, 20 de noviembre de 2025.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo

DEDICATORIA

A mis queridos padres: Teodor Arellano y Isabel Martínez, Con todo amor y cariño de siempre, mi eterno agradecimiento, quienes con su comprensión y abnegado esfuerzo hicieron posible que se cumpliera mi objetivo de ser profesional.

A mis hermanos: Lia y Jengler que me han ofrecido el amor y la calidez de la familia a la cual amo.

A mi esposa Mercedes y mi hijo Salvador por su amor y apoyo diario. Fueron mi motivación más grande para concluir con éxito esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva y a todo el personal que la conforman, por su apoyo y confianza, en especial a los docentes de la Facultad de Recursos Naturales Renovables De La Escuela Profesional De Ingeniería Ambiental que contribuyeron en mi formación profesional.
- Al Dr. JOSÉ LUIS PAREDES SALAZAR, asesor de la presente tesis, por sus recomendaciones e interés durante la elaboración del proyecto, ejecución y culminación.
- A los miembros del jurado de tesis Dr. EDILBERTO CHUQUILIN BUSTAMANTE en condición de presidente y a los miembros M. SC. ABBY SOLANGE DA CUZ RODRÍGUEZ Y M. SC. SANDRA LORENA ZAVALA GUERRERO, por su valiosa colaboración en el desarrollo del presente trabajo.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Antecedentes.....	3
Antecedentes internacionales	¡Error! Marcador no definido.
Antecedentes nacionales.....	¡Error! Marcador no definido.
2.2 El agua	5
2.3 Toxicidad de los metales pesados	5
2.4 El cadmio	5
2.3.1. Antecedentes.....	5
2.3.2. Características del agua con cadmio.....	6
2.3.3. Efectos del cadmio en la salud humana.....	6
2.3.4. Vías de exposición.....	7
2.3.5. Efectos ambientales del cadmio	7
2.5 Biosorción.....	8
2.6 La cascarilla de semilla de cacao.....	9
2.7 Reactor batch (SBR)	11
III. MATERIALES Y MÉTODOS	12
3.1 . Ubicación	12
3.1.1. Ubicación política.....	12
3.1.2. Ubicación geográfica.....	12
3.2 . Materiales.....	12
3.2.1. Material orgánico.....	12
3.2.2. Materiales de laboratorio	13

3.2.3.	Equipos de laboratorio.....	13
3.2.4.	Reactivos	13
3.3	Metodología.....	13
3.3.1	Determinación de las características físicas adecuadas de la cascarilla de semilla de cacao, para su aplicación en la biosorción de cadmio divalente en medio acuoso, referente a porcentaje de humedad, de grasa y granulometría.	13
3.3.2	Determinación de la dosis óptima y el tiempo de tratamiento para la biosorción del cadmio divalente en solución acuosa con concentración relativamente elevada del metal.....	14
3.3.3	Determinación del efecto de la aplicación de la cascarilla de semilla de cacao en la concentración de la turbidez, conductividad eléctrica y el pH, y su relación con la eficiencia de la remoción de cadmio divalente.....	15
3.3.4	Determinación del porcentaje de remoción de Cadmio	16
3.3.5	Criterios de estudio.....	16
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
4.1.	Determinación de las características físicas adecuadas de la cascarilla de semilla de cacao, para su aplicación en la biosorción de cadmio divalente en medio acuoso, referente a porcentaje de humedad, de grasa y granulometría.	19
4.2.	Determinación de la dosis óptima y el tiempo de tratamiento para la biosorción del cadmio divalente en solución acuosa con concentración relativamente elevada del metal..	20
4.3.	Determinación de la influencia de la turbidez, conductividad y el pH en la eficiencia de la remoción de cadmio divalente utilizando cascarilla de cacao	26
V.	CONCLUSIONES	33
VI.	PROPUESTAS A FUTURO.....	34
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
VIII.	ANEXOS.....	40

ÍNDICE TABLAS

Tabla	Página
1. Composición de la cascarilla de semilla de cacao	10
2. Comparación de la composición fisicoquímica de la cascarilla de semilla de cacao de dos investigaciones.	10
6. Características fisicoquímicas de la cascarilla de semilla cacao.....	19
7. Dosis óptima y tiempo de tratamiento para la remoción de cadmio a diferentes concentraciones de cascarilla de semilla de cacao.	21
9. Conductividad de la solución de cadmio al término del tratamiento a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de semilla de cacao	26
10. Turbidez de la solución de cadmio al término del tratamiento a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de semilla de cacao	28
11. pH de la solución de cadmio al término del tratamiento a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de semilla de cacao	30
12. Concentración final de cadmio después del tratamiento con la cascarilla de semilla de cacao.....	40
13. Porcentaje de adsorción de cadmio en cada tratamiento con cascarilla de semilla de cacao	41
14. Conductividad de la solución de cadmio después del tratamiento con la cascarilla de semilla de cacao.	42
15. Turbidez de la solución de cadmio después del tratamiento con la cascarilla de semilla de cacao.....	43
16. pH de la solución de cadmio después del tratamiento con la cascarilla de semilla de cacao.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. La cascarilla de semilla de cacao	9
2. Fases del ciclo de operación del SBR	11
3. Ubicación de lugar de la investigación	12
4. Variación de la concentración final de cadmio a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de semilla de cacao	23
5. Variación del porcentaje de remoción de cadmio a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de semilla de cacao	26
6. Variación de la conductividad en la solución de cadmio al término del tratamiento a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de semilla de cacao.....	28
7. Variación de la turbidez en la solución de cadmio al término del tratamiento a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla semilla de cacao.	29
8. Variación del pH en la solución de cadmio al término del tratamiento a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de semilla de cacao.	31
9. Resultados del análisis estadístico de la investigación.	¡Error! Marcador no definido.
10. Curva de Calibración para determinación de Cd.	47
11. Muestra de cascarilla de semilla de cacao para la prueba de humedad.....	48
12. Mufla para prueba de humedad de la cascarilla de semilla de cacao.....	48
13. Triturado de la cascarilla de la semilla de cacao.....	49
14. Pesado de la cascarilla de semilla de cacao molida.	49
15. Tamizado de la cascarilla de semilla de cacao.....	50
16. Tamaño de partículas de cascarilla de semilla de cacao	50
17. Pruebas experimentales para adsorción de cadmio utilizando el Test de jarras.....	51
18. Preparación de soluciones de cadmio- ditizona para lectura de cadmio en el espectrofotómetro UV visible.	51

RESUMEN

El cadmio es un metal tóxico presente en ambientes acuáticos a nivel mundial y su ingestión genera daños en el organismo. Esta investigación estudió la biosorción de cadmio divalente en un medio acuoso mediante la cascarilla de semilla de cacao (*Theobroma cacao L.*). La experimentación, inició con la caracterización de la cascarilla de semilla de cacao, cuya humedad fue 8.67%, 0.58% de grasa y una granulometría de 2 mm. Posteriormente se preparó 5 litros de una solución de 15 ppm de cadmio divalente y se aplicaron tratamientos a volúmenes de 250 ml, con tres dosis de biosorbente: 0.5%, 1% y 1.5% en peso y un testigo con 0% de biosorbente. Se aplicaron tiempos de tratamiento de 15, 30 y 60 minutos y una agitación de 150 rpm en un equipo de prueba de jarras, después del tratamiento, las muestras se filtraron y se analizaron las concentraciones de cadmio residual en el medio acuoso, mediante la técnica de espectrofotometría UV visible. Los resultados demostraron que la cascarilla de semilla de cacao tiene capacidad de adsorción de cadmio, la cual fue mayor cuando el tiempo de contacto y el porcentaje en peso de cascarilla de cacao fueron mayores. El mayor porcentaje de remoción fue de 64.67%, con 1.5% de porcentaje de peso de cascarilla de semilla de cacao y un tiempo de contacto de una hora. El análisis estadístico demostró que existe diferencia significativa entre los tratamientos realizados con un intervalo de confianza de 95%.

Palabras claves: Biosorbente, Porcentaje en peso, Prueba de jarras, Caracterización de biosorbente, tiempo de contacto.

ABSTRACT

Cadmium is a toxic metal present in aquatic environments worldwide, and its ingestion causes harm to the body. This research studied the biosorption of divalent cadmium in an aqueous medium using cocoa bean hulls (*Theobroma cacao L.*). The experimentation began with the characterization of cocoa bean hulls, which had a moisture content of 8.67%, 0.58% fat, and a particle size of 2 mm. Subsequently, 5 liters of a 15 ppm divalent cadmium solution were prepared, and treatments were applied at 250 ml volumes, with three doses of biosorbent: 0.5%, 1%, and 1.5% by weight, and a control with 0% biosorbent. Treatment times of 15, 30 and 60 minutes and stirring at 150 rpm were applied in a jar test equipment. After treatment, the samples were filtered and the residual cadmium concentrations in the aqueous medium were analyzed using the UV-visible spectrophotometry technique. The results demonstrated that cocoa bean hulls have a cadmium adsorption capacity, which was greater with increasing contact time and cocoa hull weight percentage. The highest removal percentage was 64.67%, with 1.5% cocoa bean hull weight percentage and a contact time of one hour. Statistical analysis showed a significant difference between the treatments with a 95% confidence interval.

Keywords: *Biosorbent, Weight Percentage, Jar Test, Biosorbent Characterization, Contact Time.*

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la industria minera se ha convertido en uno de los ejes económicos más importantes del país, generando grandes divisas debido a la explotación progresiva de minerales en distintas regiones, aunque debemos acotar que esta actividad coloca en riesgo permanente la conservación del medio ambiente. Uno de los componentes más impactado por la actividad minera es el componente hídrico, aunque varias empresas han adecuado sus tecnologías de tratamiento para hacer de ésta una actividad sostenible; aún queda una brecha de pequeñas empresas dedicadas a la minería informal, que extraen los recursos mineros de manera irresponsable.

La contaminación de las aguas por la actividad minera representa un grave problema, debido a la eliminación de los efluentes provenientes de los procesos químicos para la obtención de minerales, estos efluentes contienen residuos no recuperables como cadmio que a su vez es cancerígeno y que altera la calidad de las aguas receptoras.

Vena et al. (2019) en su publicación sobre la remoción de cadmio divalente utilizando alginato de sodio en efluentes mineros, menciona que se trata de un metal que tiene un valor económico, sin embargo su presencia tanto en aguas residuales de la actividad minera así como en aguas naturales, es un problema debido a su toxicidad, la cual, en el Perú se trata de controlar con lo dispuesto en el Decreto Supremo N° 004-2017- MINAM, referido a la concentración de cadmio en descargas de efluentes de actividades minera, que tiene como límite el valor de 0.01 ppm.

Entre los metales pesados, el Cd se considera uno de los principales contaminantes acuáticos en muchas partes del mundo. El Cd es un metal altamente tóxico que sigue atrayendo la atención debido a su frecuente detección en el aire, el agua y los alimentos. Diversos autores han estudiado los efectos tóxicos del Cd en diferentes especies animales, llegando a determinar que son el hígado y el riñón los principales órganos afectados tras la exposición al Cd. La toxicidad del Cd depende de la dosis, la vía de administración y la duración de la exposición. Muchas investigaciones coinciden sobre los riesgos graves y críticos así como en los efectos retardados del Cd en la función renal de los animales acuáticos (Obaiah et al., 2020).

Ante la peligrosidad del cadmio en un medio acuoso por diversas circunstancias, es importante investigar las formas de removerlo o de inmovilizarlo, con tecnologías poco costosas y amigables con el ambiente. Situaciones como la que se describe, nos lleva a evaluar materiales que puedan aprovecharse y que teóricamente presenten alguna afinidad con la

acumulación de metales pesados, como es el caso de la cáscara de la almendra de cacao, a la cual se le describe en muchas investigaciones como gran potencial de acumulación de cadmio, llegando incluso a causar algunos problemas en la comercialización de este producto por superar los límites máximos de concentración de cadmio. Esta debilidad en la cadena de comercialización podría convertirse en una fortaleza en su uso como un material biosorbente de cadmio en medio acuoso.

La presente investigación, se realizó para evaluar el efecto de la aplicación del tejido vegetal de la cáscara de semilla de cacao en concentración de cadmio en medio acuoso, a fin de tener una visión sobre su aplicación en campo, por lo cual se plantea el problema ¿Cuál es la remoción de cadmio en soluciones acuosas utilizando como biosorbente la cascarilla de semilla de cacao?, teniendo como hipótesis que la remoción de cadmio con biosorbente supera el 70 %.

1.1. Objetivo general

Evaluar la capacidad de la cascarilla de la semilla de cacao, para remover el cadmio divalente de un medio acuoso mediante biosorción.

1.2. Objetivos específicos

Determinar las características físicas adecuadas de la cascarilla de cacao, para su aplicación en la biosorción de cadmio divalente en medio acuoso.

Determinar la dosis óptima y el tiempo de tratamiento para la biosorción del cadmio divalente en solución acuosa.

Determinar la relación entre la turbidez, conductividad y el pH en la eficiencia de la remoción de cadmio divalente utilizando cascarilla de cacao.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes

Ansari et al. (2018), investigaron la eliminación de cadmio de soluciones acuosas mediante residuos de cáscara de nuez, considerando la adsorción como uno de los mejores métodos para remoción de iones metálicos en medio acuoso, se utilizó cáscara de nuez, transformada en carbón a un temperatura de 350°C por dos horas, la cual se activó con una solución de hidróxido de potasio 0.7M a 250°C por dos horas, posteriormente se determinaron las características superficiales del carbón activado sintetizado y su variación cinética e isotérmica, en condiciones de laboratorio, los tratamientos fueron realizados en soluciones acuosas de 100mg/L de cadmio, con una agitación de 120 rpm/ min a velocidad constante en un ambiente con temperatura de 22°C. La adsorción de cadmio alcanzó su nivel máximo a un pH de 6, con eficiencias de remoción de cadmio que van de 36.56% a 98.21 %.

Villabona-Ortiz et al. (2021), estudiaron los mecanismos de adsorción de cadmio divalente en biomasas residuales de cáscaras de ñame, de yuca, de cacao, de maíz y bagazo de palma aceitera, procedentes del Departamento de Bolívar en Colombia, para evaluar el efecto de la temperatura, la dosis de adsorbente y el tamaño de partícula en un sistema discontinuo. Los biomateriales se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de rayos X por energía dispersiva. Los resultados revelaron que los posibles mecanismos de adsorción de Cd^{2+} en bioadsorbentes fueron el intercambio iónico y la formación de complejos con grupos -COOH y -OH. A partir de la experimentación, se encontró que las mejores condiciones se presentaron a 55 °C, tamaño de partícula de 0,5 mm y 0,03 g de adsorbente, en la cual la cáscara de cacao, presento el mayor rendimiento de biomasa en términos de capacidades de adsorción de cadmio. Se determinó que el proceso está controlado por un mecanismo de fisiorción con fuertes interacciones entre los sitios activos y los iones Cd^{2+} .

Abbey et al. (2023), utilizaron biocarbón de cáscara de cacao como adsorbente para la adsorción de metales tóxicos de la fase acuosa, en África. El experimento se realizó en un monosistema para determinar cómo el biocarbón de cáscara de cacao puede adsorber eficientemente plomo, mercurio y cadmio de la fase acuosa. El experimento se realizó con 100 mL de diversas concentraciones de metales tóxicos de la fase acuosa, con un tiempo de contacto de 60 min y una velocidad de rotación constante de 150 rpm/min. La eficiencia de eliminación de Pb, Hg y Cd del biocarbón de cáscara de cacao osciló entre el 99,20 % y el 99,94 %, el 99,97 % y el 99,99 % y el 99,85 % y el 99,99 %, respectivamente. Los metales tóxicos mostraron una

mayor afinidad de unión con el biocarbón de cáscara de cacao. Por lo tanto, la cáscara de cacao fue eficiente para la eliminación de metales tóxicos.

Lavado-Meza et al. (2023), desarrollaron una investigación para aprovechar el residuo agroindustrial de *Theobroma cacao* de la Chanchamayo en la región Junín de Perú, como un biosorbente para eliminar Cd^{2+} de medios acuosos. Primeramente, realizaron la caracterización estructural y morfológica se ha realizado mediante mediciones utilizando métodos termogravimétricos y espectroscopía infra roja, con lo cual se identificaron los grupos funcionales C-O-C, OH, CH, NH y C=O y se confirmó que los metales se adsorben en la superficie y la presencia de hemicelulosa. Los experimentos se realizaron a un pH óptimo de 5,0, se determinó una capacidad máxima de adsorción de 58,5 mg g⁻¹. La cinética de biosorción fue rápida durante los primeros 30 min y luego alcanzó el equilibrio. En sistemas binarios (Cd-Pb y Cd-Cu) y ternarios (Cd-Pb-Cu), los cationes Cu^{2+} y, en particular, Pb^{2+} , ejercen fuertes efectos antagónicos. Utilizando HNO_3 , se logró una buena regeneración de biosorbente, eliminando eficientemente Cd^{2+} hasta tres veces.

Licareas (2019), desarrolló una investigación en Huancayo para conocer la capacidad de biosorción de la cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*) respecto a la remoción de plomo divalente en medio acuoso, los experimentos se realizaron utilizando nitrato de plomo a 1000ppm con pH neutro. La cáscara de tuna seca, triturada y tamizada aun tamaño de partícula de 0.50µm, con contenido de humedad de 15.54%, la cual fue adicionada en 500ml en la solución de plomo por un tiempo de 120 minutos, agitada a 150rpm, a una temperatura de ambiente. La eficiencia de remoción de plomo presente en la solución de nitrato de plomo fue de 98,02%.

Pillaca (2023), estudió la capacidad de los tallos de totora para bioadsorber iones de cadmio divalente en un medio acuoso a diferentes temperaturas en Huancayo. Para este fin recolectó la muestra de tallos de totora que fueron lavadas y secadas a la estufa a 65°C por 3días, luego se tritura y tamizó con un tamiz N°56. Para los experimentos se partió de una solución concentrada de cadmio de 1000 mg/L, se utilizó 0,3g de biomasa seca de totora en 50 mL de solución de cadmio de concentración 50 mg/L, manteniendo un pH de 5.0, en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, probando a temperaturas de 10 a 50°C y una agitación de 150 rpm. La máxima de remoción de cadmio que se logró con el tallo de totora fue de 92.06% a las condiciones de una temperatura de 55°C y pH de 6.0.

2.2 El agua

El agua (H_2O) es el recurso más valioso y un compuesto inagotable en la superficie de la Tierra, cubriendo más del 70% del planeta. El agua es una sustancia fluida compuesta de átomos: una gota de agua enorme y solitaria de 0,1 g contiene alrededor de 3.000 millones de billones de ellos. Cada molécula de agua está compuesta por tres átomos: dos átomos de hidrógeno en una especie de triángulo con un átomo de oxígeno, lo que nos da la popular ecuación química H_2O . La estructura ligeramente desequilibrada de los átomos de agua implica que atraen y se adhieren a una amplia gama de sustancias. Esta es también la razón por la que una amplia gama de sustancias se descompone en el agua, a la que a veces se denomina "disolvente universal". El agua puede incluso desintegrar las rocas sólidas de las que está hecho nuestro planeta; sin embargo, el proceso lleva muchos años, décadas o incluso siglos (Senthil Kumar y Yaashikaa, 2019).

2.3 Toxicidad de los metales pesados

La presencia de metales en el medio ambiente representa un riesgo permanente debido a que el mundo experimenta una epidemia silenciosa de intoxicación ambiental, debido a la creciente cantidad de metales liberados a la biosfera. Los metales pesados son aquellos cuya gravedad específica (densidad) en su estado estándar es superior a 5 g/cm^3 . Un metal pesado pertenece a un subconjunto de elementos, poco definido, que exhiben propiedades metálicas. El efecto tóxico de ciertos metales es variado y depende de las formas y dosis de impacto. En algunos casos los metales son tóxicos cuando reaccionan formando compuestos y se solubilizan. Algunos metales tienen algunas funciones biológicas en las especies y en algunos casos no, es decir no constituyen una fuente de minerales esenciales, sin embargo, presentan algunas formas específicas que son tóxicas, siendo el plomo una excepción ya que tiene efectos negativos para la salud en grandes o pequeñas concentraciones (Bathla y Jain, 2016).

2.4 El cadmio

2.3.1. Antecedentes

En 1817, el químico alemán Friedrich Stromeyer aisló el cadmio como subproducto durante el análisis de una muestra de mineral de carbonato de zinc. Stromeyer denominó al elemento recién descubierto a partir de la palabra latina "Cadmia", que se refería al óxido de zinc. Durante los dos últimos siglos, se investigó el cadmio para conocer sus propiedades y aplicación. Se utilizó en diversas industrias, como la de revestimiento de metales, de baterías y de pigmentos. Las mayores concentraciones de Cd en suelos y sedimentos se asocian comúnmente con la presencia de componentes minerales específicos. Además, ciertas

condiciones fisicoquímicas, como el aumento de los niveles de pH o las condiciones anóxicas (bajo contenido de oxígeno), también pueden contribuir a la acumulación de Cd en estas matrices ambientales. Si bien el Cd tiende a unirse a las fracciones menos estables, como las fracciones intercambiables, carbonatadas y de óxido hidratado, metales pesados que se unen con mayor fuerza a las fracciones orgánicas y sulfídicas (Ankush et al., 2024).

2.3.2. Características del agua con cadmio

Los metales pesados ingresan a los ambientes acuáticos a través de efluentes industriales, escorrentías terrestres y descargas atmosféricas. El sedimento es el principal depósito, con formas solubles presentes en los sistemas acuáticos. La temperatura, el pH, el oxígeno disuelto, la dureza, la salinidad y la concentración influyen significativamente en la disponibilidad de metales. Los ecosistemas marinos presentan interacciones complejas debido a la química del agua y la hidrodinámica de los metales pesados, que influyen significativamente en la disponibilidad en ambientes acuáticos. El Cd está presente en agua dulce en formas solubles de Cd^{2+} , $\text{Cd}(\text{OH})_2$ y CdCO_3 ; mientras que, con el aumento de la salinidad del agua, aumenta el predominio de diversas especies de cloro. La biotransferencia de Cd a los animales acuáticos puede ocurrir mediante el consumo de iones libres de metales pesados, pero principalmente a través de plantas con mayores concentraciones, como las praderas marinas. Los niveles de Cd varían entre especies, dentro de cada especie y según la ubicación. Los mariscos tienen niveles más altos de Cd que los peces, y estos últimos presentan las mayores concentraciones en el intestino, el hígado, las branquias y el tejido muscular. Las variaciones entre especies y dentro de cada especie pueden deberse a factores ambientales, genéticos y fisiológicos, y variaciones estacionales (Jha y Kumar, 2024).

2.3.3. Efectos del cadmio en la salud humana

El Cd ambiental representa riesgos significativos para la salud humana debido a su amplia presencia en el medio ambiente y su capacidad de acumularse en el organismo con el tiempo. El cadmio ingresa al organismo de diferentes formas, que puede ser las vías respiratorias, el consumo de alimentos y agua contaminados, y también por las dermis cuando entra en contacto con superficies contaminadas, el metal ingerido puede acumularse en diversos órganos y tejidos, ejerciendo efectos tóxicos en múltiples sistemas fisiológicos (Ali et al., 2023).

Uno de los principales objetivos de la toxicidad por Cd son los riñones, donde se acumula y causa daño a las células epiteliales tubulares renales, lo que conduce a disfunción renal. La exposición crónica al Cd se ha asociado con un mayor riesgo de enfermedad renal

crónica, proteinuria y cáncer renal. Se cree que el daño renal inducido por Cd es resultado del estrés oxidativo, la inflamación y la interrupción de las vías de señalización celular. Además de la toxicidad renal, la exposición al Cd puede ejercer otros efectos negativos en la salud. El Cd puede acumularse en el sistema óseo y despojando al calcio de los huesos, lo que conduce a la osteoporosis y a un mayor riesgo de fracturas (Ran et al., 2023).

2.3.4. Vías de exposición

El Cd está presente en el suelo, el agua y los minerales. La exposición a múltiples sustancias, representa una vía crítica de exposición al Cd en humanos. El Cd se encuentra comúnmente en diversos compartimentos ambientales debido a las emisiones industriales, las prácticas agrícolas y la eliminación inadecuada de residuos. La inhalación de partículas atmosféricas cargadas de Cd es una vía importante de exposición, especialmente en zonas urbanas e industriales, donde los niveles de Cd en el aire son elevados. Los estudios indican que el Cd inhalado se absorbe fácilmente por el sistema respiratorio, lo que contribuye significativamente a su bioacumulación sistémica. La ingestión representa otra vía principal de exposición al Cd, ya que contamina el agua y los alimentos. Las emisiones antropogénicas de Cd en el aire provienen principalmente de la quema de carbón, la combustión de combustibles, la fundición de metales no ferrosos, la fundición de acero y hierro, la incineración de residuos y de las industrias de fertilizantes fosfatados y cemento (Yang et al., 2025).

2.3.5. Efectos ambientales del cadmio

La contaminación del suelo por cadmio se produce cuando su concentración supera los límites de seguridad. Esta contaminación puede ser perjudicial para la salud del suelo, afectando sus propiedades físicas, químicas y biológicas. El cadmio puede persistir en el suelo durante largos periodos, lo que provoca efectos negativos a largo plazo. Puede interferir con la en el desarrollo de los ciclos del suelo, lo que reduce su fertilidad y actividad microbiana propia del suelo y altera los sistemas enzimáticos responsables del ciclo de los nutrientes.

El cadmio puede entrar en los ecosistemas acuáticos a través de diversas fuentes, como vertidos industriales, escorrentías agrícolas y deposición atmosférica. Una vez que el cadmio se disuelve en los ecosistemas acuáticos, su alcance es en fuentes superficiales y también subterráneas. El agua contaminada representa una cadena de riesgos para el desarrollo normal de organismos acuáticos y con efectos irreversibles a corto y largo plazo en la salud general de los ecosistemas acuáticos. El cadmio también puede entrar al medio ambiente a través de la deposición atmosférica. Las emisiones industriales, vehiculares y la incineración de residuos

que liberan partículas de cadmio al aire, que luego pueden depositarse en las superficies del suelo y el agua a través de la precipitación (Sattar et al., 2025).

2.5 Biosorción

La biosorción es una de las técnicas de sorción que se realiza con biomateriales. Actualmente se considera un proceso sencillo, de bajo costo y amigable con el ambiente, para eliminar contaminantes. La biomasa utilizada puede incluir células vivas intactas o material biológico transformado, es decir biomasa viva o muerta. Cuando se utiliza biomasa muerta, los contaminantes se unen pasivamente por medio de mecanismos iónicos, químicos o físicos (biosorción) y con la biomasa viva, existe actividad metabólica de la biomasa. Que se interiorizan en la membrana celular. Los contaminantes terminan acumulándose dentro de la célula. Además, se produce actividad enzimática en la biomasa viva, que repercuten en el estado del contaminante y se pueden biodegradar y biotransformar (Torres, 2020).

El término sorción incluye tanto absorción como adsorción. La absorción es la incorporación de una sustancia en una forma diferente, mientras que la adsorción es la unión física de moléculas/iones a la superficie de un material sólido mediante enlaces. El material adsorbido en la interfaz es el adsorbato, y la superficie sólida donde se produce la adsorción se denomina adsorbente. La unión del contaminante a la superficie del biosorbente se realiza por la generación de interacciones del tipo físico y/o químico. La composición de la pared celular desempeña un papel importante en las interacciones de biosorción. La pared celular de diferentes grupos microbianos está compuesta por complejos polisacáridos, proteínas y lípidos, que a su vez tienen diferentes grupos funcionales ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{SH}$, $-\text{CO}$, $-\text{COOR}$). Estos grupos funcionales desempeñan un papel clave en la biosorción de cationes. Durante la biosorción de metales, los cationes y protones naturales que permanecen unidos al grupo funcional de la superficie microbiana se intercambian con iones metálicos (Poonam y Pradeep, 2021).

Se han descrito varios métodos para la eliminación de sustancias químicas peligrosas mediante biosorción. Se han establecido categorías dependientes o independientes del metabolismo. Si bien la bioacumulación requiere actividades metabólicas, la biosorción se produce sin intervención metabólica. A diferencia del proceso activo de bioacumulación, el proceso pasivo de biosorción puede completarse en un tiempo más corto. La biosorción es un proceso de varias etapas que incluye adsorción, quelación/complejación, intercambio iónico y precipitación superficial (Gouda y Taha, 2023).

2.6 La cascarilla de cacao.

Durante el procesamiento del cacao, se generan diversos subproductos, como la cáscara del grano de cacao, la cáscara de cacao y la pulpa, que se estima representan el 85% de la producción de cacao. Si se dejan, estos residuos generan contaminación y pérdidas económicas. El impacto ambiental de la biomasa residual del fruto de cacao está relacionado con la generación de biogas por degradación bacteriana; además, la eliminación de estos subproductos puede propagar enfermedades, causando importantes pérdidas en los cultivos. La industria del cacao genera residuos que generan problemas ambientales y ecológicos, y dificultan su correcta utilización en la economía circular. Desafortunadamente, considerando la creciente demanda y utilización de productos de cacao, estos residuos se generan en una proporción mayor (Mariatti et al., 2021).

Los residuos generados durante la producción incluyen la cáscara de la mazorca de cacao, la pulpa y las cáscaras de los granos de cacao. La fibra dietética, los polifenoles, las metilxantinas y los fitoesteroles son algunos de los principales compuestos extraídos de la cáscara de la mazorca de cacao. En las últimas décadas, de la cáscara de los granos de cacao se han extraído mediante tecnologías de extracción avanzadas y ecológicas, diversos compuestos tales como: flavonoides, alcaloides, polifenoles, polisacáridos, antocianinas, fibra dietética, entre otros (Belwal et al., 2022).



Figura 1. La cascarilla de semilla de cacao

Fuente: Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (2022).

La composición de la cascarilla de semilla cacao es mostrada (Tabla 1) considerando la evaluación característica de este material, en la cual resalta su alto contenido de fibra y de extracto libre de nitrógeno.

Tabla 1. Composición de la cascarilla de semilla de cacao

Característica	Rango de valores en porcentaje (%)
Contenido de humedad	De 5.4 a 15.3
Contenido de proteína *	De 6.3 a 10.4
Determinación de fibra *	De 23.4 a 36.2
Contenido de grasa cruda*	De 0.5 a 2.4
Determinación de extracto libre de nitrógeno*	De 31.8 a 61.4
Contenido de cenizas*	De 6.0 a 10.8

(*) Características determinadas en base seca

Fuente: Teneda et al. (2018).

Se presenta la composición de la cascarilla de cacao, según el análisis fisicoquímico de dos investigaciones en la cual resalta el alto contenido de fibra, proteínas y carbohidratos.

Tabla 2. Comparación de la composición fisicoquímica de la cascarilla de semilla de cacao de dos investigaciones.

Parámetros	Según Sangronis et al. (2014)	Según Villamizar y López (2017)
Humedad (%)	3,46-5,08	6,7
Cenizas (%)	7,51-8,09	11,4
Fibra dietética (%)	ND	56,8
Grasa (%)	1,09-1,38	0,7
Proteínas (%)	18,54	6,3
Carbohidratos (%)	70,85-72,82	11,3

ND: No determinada

2.7 Reactor batch (SBR)

La planta de tratamiento de aguas que opera por lotes, es también conocida como Reactor Secuencial por Lotes (SBR), es un método popular para el tratamiento de aguas residuales. En un reactor secuencial por lotes (SBR), todo el proceso se lleva a cabo en un solo tanque, dependiendo del sistema SBR, junto con sus variantes e híbridos, puede implicar uno o varios tanques. Cada uno generalmente consta de los siguientes cinco pasos, como se muestra en la Figura 2: llenado, reacción, sedimentación, extracción y reposo (Abdullad, 2019).

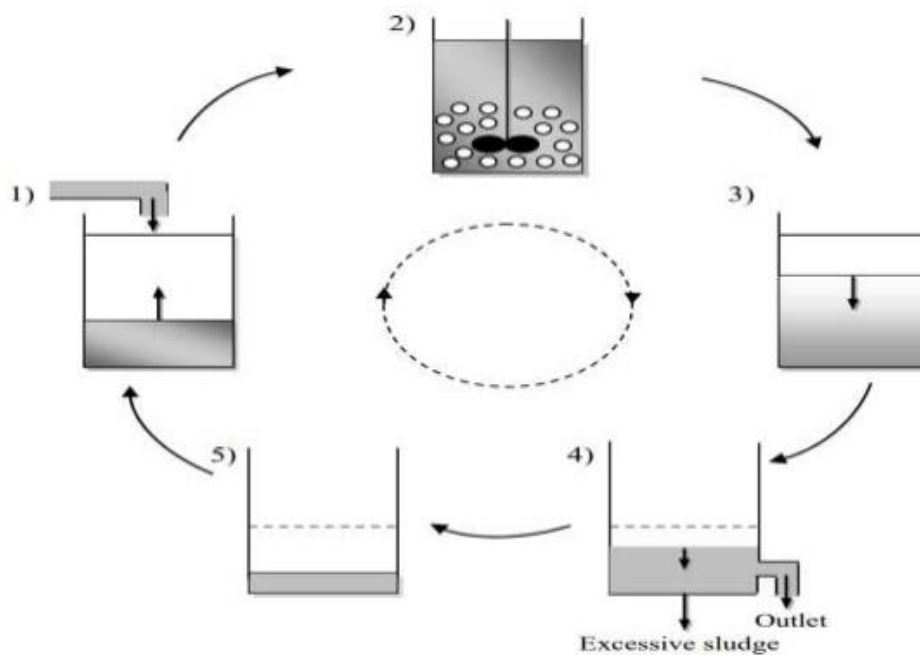


Figura 2. Fases del ciclo de operación del SBR

El proceso SBR es una versión modificada del conocido proceso de lodos activados. Es posible optimizar el cumplimiento de los criterios actuales de vertido de efluentes mediante una mayor flexibilidad del proceso y alternativas cuando se integra una práctica de tratamiento basada en un sistema por lotes, como los SBR. El sistema SBR es muy eficaz en la eliminación de nitrógeno y fósforo. Los procesos SBR son más estables que los procesos continuos, pero requieren un control de proceso más preciso. El sistema SBR se utiliza comúnmente para entradas de aguas residuales más pequeñas y puede configurarse con un solo tanque o con una configuración de varios tanques en conjunto. Este método emplea una serie de ciclos de llenado y vaciado. Un ciclo convencional tiene cinco etapas funcionales: llenado, reacciones, sedimentación, decantación y condición de reposo (Indranill et al., 2024).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación

3.1.1. Ubicación política

La investigación fue desarrollada en los ambientes del Laboratorio de Calidad del Agua, de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, de la ciudad de Tingo María, perteneciente al distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, Región Huánuco.

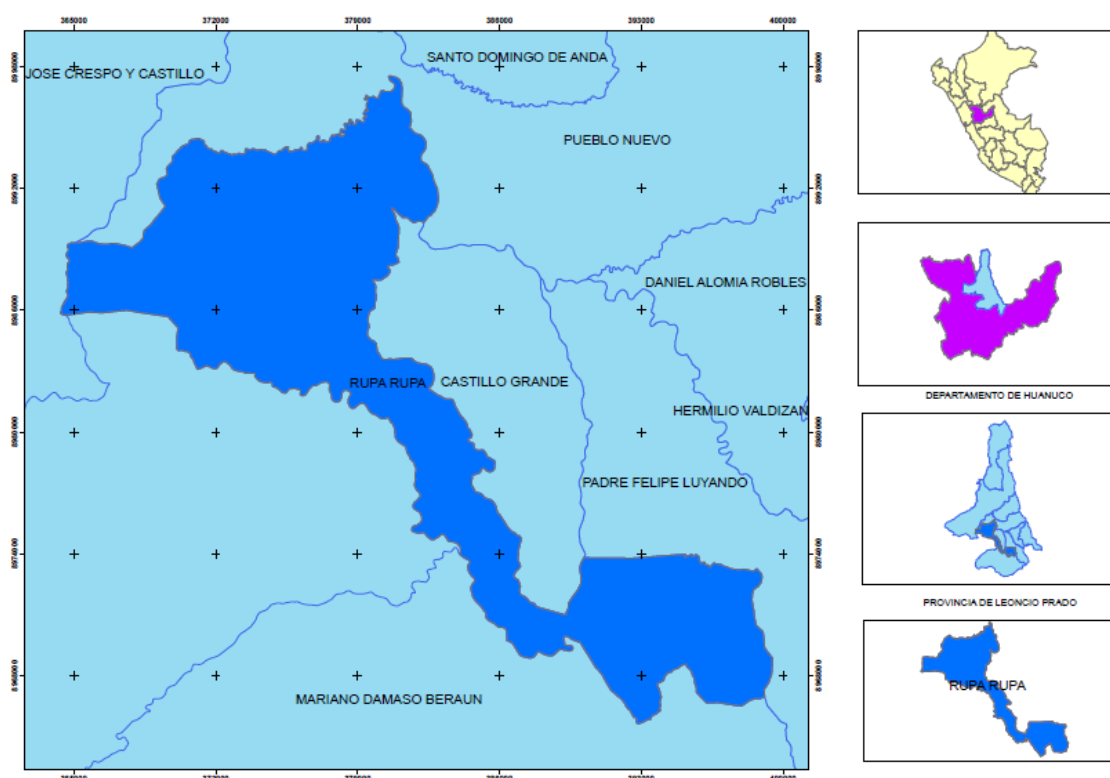


Figura 3. Ubicación de lugar de la investigación

3.1.2. Ubicación geográfica

El Laboratorio de Calidad del Agua se localiza en las coordenadas geográficas 09° 18' 00" latitud sur y 76° 01' 00" longitud oeste, a 660 m.s.n.m. de altitud, dentro del empalme Tingo María hoja 19-k de la carta nacional del Instituto Geográfico Nacional.

3.2. Materiales

3.2.1. Material orgánico

Cascarilla de semilla de cacao

3.2.2. Materiales de laboratorio

Los materiales de laboratorio utilizados fueron: pizeta, fioles, pipetas graduadas, embudos de vidrio, papel filtro, frascos de plástico 100 ml, probeta de 50 ml de plástico, crisoles de porcelana, pinzas para mufla y soporte universal, bureta, cronómetro, vasos de precipitados, matraces Erlenmeyer, tamices con mallas N° 10 y 18.

3.2.3. Equipos de laboratorio

Espectrofotómetro UV visible, Multiparámetro marca Hanna, Termómetro, Estufa marca MEMMERT, Molino de laboratorio para preparación de muestras, Equipo de Jar Test de laboratorio.

3.2.4. Reactivos

Solución patrón de Cadmio a 1000 ppm Marca Merck, Ditzona, Ácido sulfúrico al 37%, Hidróxido de sodio.

3.3 Metodología

3.3.1 Determinación de las características físicas adecuadas de la cascarilla de cacao, para su aplicación en la biosorción de cadmio divalente en medio acuoso, referente a porcentaje de humedad, de grasa y granulometría.

Para determinar las características fisicoquímicas de la cascarilla de del fruto del cacao, se procedió a preparar la muestra, según el siguiente procedimiento:

Procesamiento de la muestra

Con la cascarilla del fruto colectada para investigación, la cual procedió de un centro de procesamiento de cacao, donde se obtiene como un subproducto, encontrándose en condiciones de deshidratación y en diversos tamaños de partícula, la cual se procedió a uniformizar, utilizando un mortero. Con dicho polvo de partículas casi uniformes, se procedió a realizar el análisis de humedad que consistió en llevar a la estufa a 50°C durante 48h (Borrallo, 2019), obteniéndose un porcentaje de humedad de 8% las muestras de cascara de cacao, para proceder a moler hasta obtener una granulometría de 40 mesh.

Determinación del contenido de Humedad

Para determinar la humedad de la muestra se realizó según el método de pérdida de masa de agua en una estufa convencional. Para ello se procedió a llevar a la estufa 5 g de muestra en un crisol de porcelana a 130 °C durante 4h (Borrallo, 2019).

Determinación del contenido de Grasa

Para determinar el porcentaje de grasa de la muestra de cascarilla del fruto de cacao (*Theobroma cacao L.*) se tomó como referencia la metodología aplicada por Castillo et al. (2008), donde se utilizó la extracción de grasa con éter de petróleo con la posterior evaporación del solvente a una temperatura aproximada 100°C.

Evaluación de la granulometría

Las muestras de cascarilla de cacao se molieron y se tamizaron para obtener tres tamaños de partícula utilizando tamices con mallas N° 5, 10 y 18), seguidamente se vertieron en vasos de precipitación de 500 ml, con agua destilada y se procedió a mezclar por agitación utilizando el test de jarras, sistema que permitió trabajar simulando pequeños reactores de laboratorio, con un sistema SBR, con agitaciones continuas de 10 minutos hasta su completa dispersión en el medio acuoso (Pivokonský et al., 2022). Finalmente se seleccionó el tamaño de partícula de mejor dispersión en el medio.

3.3.2 Determinación de la dosis óptima y el tiempo de tratamiento para la biosorción del cadmio divalente en solución acuosa con concentración relativamente elevada del metal.

Para el cumplimiento de este objetivo, se procedió a preparar una solución de 5 L de una solución de 15 mg/L de cadmio divalente, a partir de una solución patrón de cadmio de 1000 ppm de la marca Merck, para la dilución se utilizó agua destilada.

Se realizaron los ensayos en vasos de precipitación de 300 ml, donde se colocó 250 ml de solución de cadmio divalente y se adicionaron tres dosis del biosorbente a 0.5, 1 y 1.5% en peso. También se consideró un testigo con 0% de biosorbente.

Los tiempos de tratamiento que se aplicaron para evaluar la biosorción de cadmio fueron de 15min, 30min y 60 min, en el test de jarras después de este tratamiento, las muestras

se filtraron y se analizaron las concentraciones de cadmio en todos los tratamientos, para el cálculo de remoción de cada tratamiento.

La concentración de cadmio en el agua se determinó utilizando la solución estándar de cadmio, a partir de la cual se prepararon soluciones con diferentes concentraciones para construir la curva de calibración. Mediante la reacción de las soluciones con ditizona en presencia en medio básico, utilizando una solución de NaOH 2 M para elevar el pH a 11, se formó un complejo de Cd-ditizona de color naranja. Posteriormente se dió lectura de la absorbancia de cada solución a una longitud de onda de 549 nm (Fouad, 2014).

Con la curva de calibración construida, y con las muestras filtradas y tratadas según lo descrito en el párrafo anterior se determinó la concentración final de cadmio en cada tratamiento con sus respectivas repeticiones.

Procedimiento experimental de la investigación.

La implementación del sistema experimental para la investigación se logró con el funcionamiento de un test de jarras, como sistema batch (SBR), debido a las condiciones adecuadas del equipo para realizar la agitación del medio acuoso mediante una mariposa a una revolución controlada a 150 rpm.

3.3.3 Determinación del efecto de la aplicación de la cascarilla de semilla de cacao en la concentración de turbidez, conductividad eléctrica y el pH, y su relación con la eficiencia de la remoción de cadmio divalente.

Los tratamientos aplicados, fueron evaluados mediante la variación de los parámetros fisicoquímicos turbidez, Conductividad eléctrica y pH, los cuales son parámetros fisicoquímicos básicos asociados a la presencia de iones, esto con el propósito de analizar y relacionar sus cambios respecto a la concentración de cadmio divalente remanente en la solución.

Determinación del porcentaje de remoción de Cadmio

Los resultados que se obtuvieron con el espectrofotómetro respecto a lectura de la concentración de cadmio se determinó la remoción del metal y se comparó haciendo uso de la siguiente formula:

$$\% \text{ de Remoción} = ((C_i - C_f) / C_i) \times 100$$

Donde:

C_i = Concentración inicial de la muestra de cadmio

C_f = Concentración Final de la muestra de cadmio

3.3.4 Criterios de estudio

Nivel de investigación

La presente investigación tiene un nivel explicativo, ya que se utilizó la recolección de datos de las variables en estudio, para probar una hipótesis con base en la medición numérica (Hernández et al., 2010).

Tipo de investigación

El tipo de investigación fue aplicativo, Hernández et al. (2010) afirma que en este tipo de estudio busca la aplicación de los conocimientos adquiridos a la vez que se adquieren otros.

Método de investigación

El método de investigación fue inductivo y analítico, el primer método utilizó el razonamiento para obtener conclusiones que parten de hechos aceptados como válidos, mientras que con el método analítico se estudió y conocieron los resultados obtenidos.

Diseño de investigación

Considerando la manipulación de las variables independientes, el diseño fue experimental y factorial 3^2 , es decir dos factores y tres niveles (Hernández et al., 2014).

Tabla 3. Variables de investigación

Tipos de variable	Descripción de la variable	Dimensiones de la variable	Indicadores
Independientes	La cascarilla de cacao aplicada en medio acuoso	1.El porcentaje en peso de cascarilla de cacao	Medida del peso de cascarilla de cacao: 0.5%, 1%, 1.5%.
		2.El tiempo de contacto.	Medida del tiempo de contacto: 15 min, 30 min y 60 min.
Dependiente	Biosorción de cadmio disponible	La remoción de cadmio divalente.	Variación del valor de concentración de cadmio.

Tabla 4. Niveles de las variables de la investigación

Variable de investigación	Factor A	Factor B
	Peso de cascarilla de cacao	Tiempo de contacto
	Niveles	Niveles
Biosorción de cadmio disponible.	0.5% en peso 1.0% en peso 1.5% en peso	15 minutos 30 minutos 60 minutos

Donde:

A: El porcentaje en peso de la cascarilla de cacao: 0.5%, 1%. 1.5%.

B: El tiempo de contacto: 15 min, 30 min y 60 min

Tabla 5. Matriz de diseño de la investigación

N° experimento	Orden Aleatorio	Factor A % peso de CC	Factor B Tiempo de contacto
1	1	-1	-1
2	8	0	-1
3	9	1	-1
4	3	-1	0
5	6	0	0
6	2	1	0
7	7	-1	1
8	5	0	1
9	4	1	1

A cada tratamiento se le realizó tres réplicas.

Donde: Para % peso de cascarilla de cacao (CC): 0.5% (-1), 1.0% (0) ,1.5% (+1) y Tiempo de contacto:15 minutos (-1),30 minutos (0), 60 minutos (+1).

3.2.2.1. Análisis estadístico

El diseño experimental es un diseño factorial 3^2 con tres repeticiones. Se utilizó el programa InfoStat para realizar un ANVA para evaluar la dispersión de los resultados y una prueba de Tukey para comparar la significancia de los tratamientos para la biosorción de cadmio disponible, por efecto de la cascarilla de cacao.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación de las características físicas adecuadas de la cascarilla de semilla de cacao para su aplicación en la biosorción de cadmio divalente en medio acuoso, referente a porcentaje de humedad, de grasa y granulometría.

De la información obtenida con la determinación de parámetros fisicoquímicos como la humedad y el contenido de grasa los que se muestran (Tabla 6), se puede afirmar que la cascarilla de cacao utilizada en la investigación se encuentra dentro de los valores típicos de este componente del fruto de cacao.

Tabla 6. Características fisicoquímicas de la cascarilla de cacao.

Parámetro fisicoquímico	Valor promedio
Porcentaje de humedad (%)	8.67
Porcentaje de grasa (% en base seca)	0.58
Granulometría (mm) Malla N° 10	2

Estas condiciones, fundamentalmente su bajo contenido de grasa, han permitido utilizar la cascarilla de cacao, como un polvo adsorbente que, aplicado con un diámetro de partícula adecuado, permitió, la dispersión de las partículas en el seno acuoso, mediante la agitación, que favorecía, la mojabilidad del material, sin embargo, el contenido de grasa aunque en bajo porcentaje interrumpe la transferencia de agua en la partícula al inicio del proceso y posteriormente se inicia el intercambio de algunos componentes de la solución hacia las partículas en suspensión y viceversa, dando lugar a la biosorción.

Li et al.(2024), realizaron una investigación sobre el efecto de las características físicas de material particulado en el ambiente y su impacto en la deposición pulmonar, aquí estos investigadores mencionan que, para el caso específico, se acepta generalmente que el tamaño de las partículas es el factor predominante que determina su deposición pulmonar, pero que existe evidencia sólida de que su hidrofobicidad también desempeña un papel significativo en la mediación de la deposición pulmonar. Sin embargo, en comparación con numerosos estudios sobre la deposición dependiente del tamaño de partícula, aún se desconoce en gran medida cómo la hidrofobicidad de las partículas. Esta brecha de conocimiento podría deberse en parte a dificultades técnicas para caracterizar cuantitativamente la hidrofobicidad de las partículas.

Para la presente investigación se asocia que el contenido de grasa en las partículas de la cascarilla de cacao, le imparte un grado de hidrofobicidad, e interfiere la adsorción de cadmio en el medio acuoso.

La adsorción de metales pesados en sílice mesoporosa modificada orgánicamente se produce mediante una combinación de complejas interacciones físicas y químicas. La adsorción física, es impulsada por fuerzas más débiles como las interacciones de Van der Waals, las interacciones hidrofóbicas con el relleno de poros dentro de la estructura mesoporosa, también contribuye. Otras interacciones, como los enlaces de hidrógeno y las interacciones hidrofóbicas entre iones metálicos, agua y modificadores, pueden influir aún más en el proceso (Ezzeddine et al., 2025).

Nur et al. (2024) en su investigación sobre el efecto del tamaño de partícula en un proceso de adsorción utilizando biochar como adsorbente, mencionan que trabajaron con un tamaño de partícula específico que presentó una superficie muy porosa y rugosa, con poros pequeños e irregulares. Además, se reveló que un biocarbón de cáscara de girasol fraccionado finamente presenta una morfología porosa con una estructura porosa pronunciada y poros más finos en toda la superficie. Este resultado coincide con el principio de que la superficie por unidad de masa de las partículas más pequeñas es mayor, lo que resulta en una mayor densidad de poros y posibles sitios de adsorción. Los poros más finos observados en partículas más pequeñas también implican una mayor afinidad por los adsorbatos, crucial para procesos de adsorción eficientes.

4.2. Determinación de la dosis óptima y el tiempo de tratamiento para la biosorción del cadmio divalente en solución acuosa con concentración relativamente elevada del metal.

La concentración final o remanente de cadmio en los tratamientos se ve influenciada por la cantidad de cascarilla de cacao aplicada en cada unidad experimental, así como también por el tiempo de contacto, ya que se observa como disminuye la concentración de cadmio a razón de que estas variables incrementan su valor (Tabla 7). Es importante mencionar que el testigo también presentó una reducción en concentración de cadmio esto puede deberse a las reacciones entre iones del agua y iones de cadmio o la migración de algunos de estos a las paredes de los vasos de precipitación.

El efecto de reducción de concentración de cadmio observado podría explicarse por la capacidad de adsorción de la partícula de la cascarilla de cacao, ya que es un material biológico que está compuesto por alto porcentaje de proteínas y carbohidratos, que a su vez en su

estructura química presentan diversos grupos funcionales entre estos los hidroxilos que tienen gran afinidad con los iones metálicos, produciendo así un proceso de adsorción.

Tabla 7. Dosis óptima y tiempo de tratamiento para la remoción de cadmio a diferentes concentraciones de cascarilla de cacao.

Conc. inicial		Conc. final de Cd a dosis diferentes de cascarilla de cacao			
Cd (mg/L)	Tiempo (min)	(mg/L)			
		0,5 %	1,0%	1,5%	0%
15	15	12.97	11.83	10.33	14.63
15	30	10.80	9.80	8.57	14.77
15	60	9.30	6.33	5.30	14.63

Adicionalmente al efecto de la calidad y cantidad de componentes que se presentan en la cascarilla de cacao, está también como un factor importante el tamaño de partícula que permite exponer una mayor área superficial disponible que favorece al proceso de adsorción.

Feng y Wang (2025) desarrollaron una investigación para conocer la adsorción de plomo y cadmio utilizando con adsorbente las flores de manzanilla y la cáscara de luffa, para el desarrollo óptimo del proceso de adsorción, entre otros factores, consideraron el tipo de adsorción, optando por la adsorción por lotes y el tratamiento de los adsorbentes con soluciones ácidas y también básicas. Los sorbentes tratados con una solución básica, tienen una mayor capacidad de adsorción y una cinética de adsorción para ambos iones rápida y dinámica alcanzando eficiencias de recuperación del 87 al 90 % en tres ciclos de adsorción-regeneración, que los investigadores atribuyen a la presencia de grupos OH, C=O, CO y COO de la superficie que desempeñaron un papel fundamental en el proceso de adsorción y también a la elección y control del pH adecuado para la adsorción de los metales pesados, ya que para el caso del cadmio se realizó un estudio de pH en una solución de Cd²⁺ de 250 ppm para investigar la capacidad máxima de adsorción de los biosorbentes, estableciéndose el pH 8,0 como óptimo para la adsorción sin observarse precipitación de los metales.

Muchos estudios han explorado la mejora del área superficial como medio para optimizar la capacidad de adsorción de los carbones activados sin considerar el desarrollo de grupos funcionales superficiales. Un adsorbente altamente poroso no se traduce necesariamente en una alta capacidad de adsorción si los grupos funcionales con actividad de adsorción no están bien desarrollados en su superficie. Considerando tanto la mejora del área superficial como el

desarrollo de grupos funcionales con actividad de adsorción adecuados en la fabricación de carbones activados, la correcta manipulación de variables clave del proceso, como la temperatura, el tiempo y la concentración del impregnante químico, puede ayudar a lograr carbones activados de alto rendimiento. Si bien esto puede lograrse para algunas biomásas mediante activación *in situ*, la vía de activación *ex situ* puede ser más adecuada para otras, como el caso de utilización los residuos de la piel del cerdo, como adsorbente de cadmio la cual trabajando en soluciones acuosas con 150 mg/L de cadmio, con agitación y control de pH, se logró una máxima remoción de 91.12% del metal (Orugba et al., 2024).

El carbón activado elimina eficazmente los iones de cadmio mediante la complejación superficial, donde los iones de cadmio se unen a grupos funcionales en la superficie del carbón, y el intercambio iónico, donde los iones de cadmio reemplazan a otros cationes. Además, la atracción electrostática entre los iones Cd^{2+} y los sitios con carga negativa en la superficie del carbón activado mejora aún más la adsorción de cadmio (El- Refaey, 2016).

Los absorbentes de biorresiduos, como las cáscaras de frutas y verduras, han demostrado un gran potencial para la adsorción de iones de metales pesados en soluciones acuosas, es un proceso relativamente económico y eficiente; lo que los convierte en una opción atractiva para la remediación ambiental. especialmente para aplicaciones de tratamiento de agua a gran escala. La presencia de grupos funcionales en la superficie de los absorbentes de biorresiduos, como COOH , C=O , C-O , CONH , NH y -OH , que pueden adsorber físicamente, intercambiarse iónicamente o unirse químicamente con iones metálicos, reteniéndolos, especialmente cuando estos grupos se encuentran por encima del punto isoeléctrico. Diversos estudios han demostrado que los tratamientos químicos pueden mejorar significativamente la capacidad de adsorción de los absorbentes de biorresiduos al activar los posibles sitios de unión y minimizar las interferencias estructurales (Sheraz et al., 2024).

En esta investigación se utiliza como material biosorbente la cascarilla de cacao, la misma que según los resultados obtenidos, presenta capacidad de remoción de cadmio, debido a su composición química, Sangronis et al. (2014) mencionan que la cascarilla de cacao contiene proteínas, carbohidratos, lípidos, vitamina C en mínimas cantidades, y con compuestos fenólicos, este material representa, alrededor del 12 % del peso de la semilla; es seca, crujiente y de color marrón.

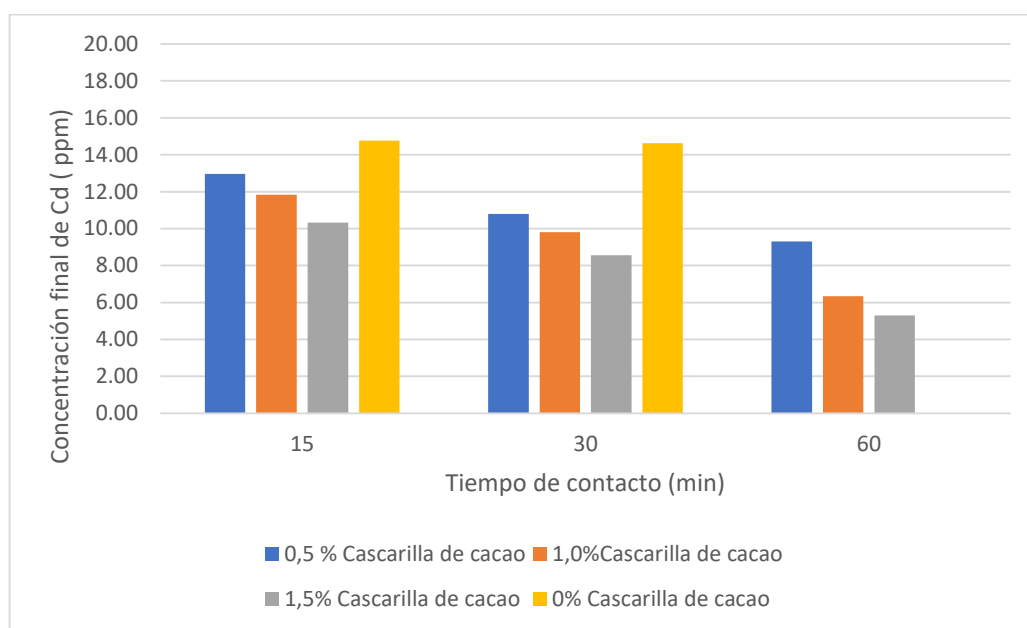


Figura 4. Variación de la concentración final de cadmio a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de cacao

El porcentaje de remoción de cada tratamiento, donde se resalta la relación directa entre remoción de cadmio- porcentaje en peso de cascarilla de cacao y tiempo de contacto (Tabla 8), si bien es cierto este incrementó en forma progresiva sin embargo el máximo porcentaje de remoción no es muy significativo, siendo un 64.67%, por otro lado con estos resultados se podría inferir que posiblemente si incrementa el tiempo de contacto, el porcentaje de remoción podría ser mayor e incluso significativo.

En el análisis de varianza se demostró estadísticamente con una probabilidad del 5% que los tratamientos tienen diferencia estadística entre tratamientos

Tabla 8. Análisis de variancia para el porcentaje de remoción de cadmio a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de cacao.

Fuente de variación	gl	SC	CM	F	p-valor
Dosis de biosorvente	3	5792	1930	449	<0.0001
Tiempo	2	4799	2399	558	<0.0001
Dosis de biosorv * tiempo	6	4126	687	160	<0.0001
Error	24	103	4		
CV (%)			7.78		

En la prueba Tukey ($p \leq 0.05$) para el porcentaje de remoción de cadmio, se mostró T0 (testigo) y T1 (0.1%) presentaron valores bajos de porcentaje de remoción de cadmio, de 4.3 y

17.3 respectivamente, y se registró valores más altos en el porcentaje de remoción de cadmio en los tratamientos T2 (1.0%) y T3 (1.5%).

Por otra parte, el tratamiento T3 registró el valor más alto.

Tabla 9. Porcentaje de remoción de cadmio a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de cacao.

Trat. (%)	clave	Tiempo de exposición (minutos)		
		15	30	60
0.0	T0	2.44±1.20 ^f	1.56±1.20 ^h	2.44±1.20 ^h
0.5	T1	13.56±1.20 ^{fg}	28.00±1.20 ^e	38.00±1.20 ^d
1.0	T2	21.11±1.20 ^{fg}	34.67±1.20 ^d	57.78±1.20 ^b
1.5	T3	31.11±1.20 ^g	42.89±1.20 ^c	64.67±1.20 ^a

Los valores representan (promedio ± EE), promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Ali et al. (2024) investigaron treinta biomásas vegetales para determinar su capacidad potencial como biosorbentes de cadmio y otros metales, a fin de encontrar un nuevo biosorbente para la eliminación de cadmio (Cd^{2+}) en agua contaminada; se trata de la hoja de *Sesbania bispinosa*, una especie casi silvestre distribuida en muchas partes del mundo con diversos fines entre estos como forraje. Los experimentos fueron desarrollados mediante el método de biosorción por lotes, considerando el pH de la solución, el tiempo de contacto, la dosis de biosorbente y la concentración inicial de Cd^{2+} . La eliminación de Cd fue de 67,51 %, un valor cercano a la remoción obtenida con la cascarilla de cacao empero es importante mencionar que la solución acuosa contenía también cromo, plomo y cobre, sobre los cuales también se obtuvo una significativa remoción y el biosorbente usado se puede regenerar fácilmente aplicando una solución de HCl 0,1 M como agente desorbente. Se concluye que las hojas de *S. bispinosa* podrían ser un biosorbente novedoso, económico y ambientalmente responsable para el tratamiento de aguas contaminadas con cadmio divalente.

Astudillo et al.(2020), realizaron un estudio de remoción de plomo y cadmio, utilizando como biosorbente la hoja de maíz sometidas a un secado y pulverizado de las hojas, en sus resultados lograron establecer que el tiempo de contacto óptimo para remoción de plomo y cadmio con la hoja de maíz era de 10 minutos, llegando a determinar que a los diez minutos se removió el 59% de la concentración de cadmio y después de este tiempo la concentración de cadmio se mantuvo constante, a diferencia de los resultados de la presente investigación, el porcentaje máximo fue de 64.67% logrado en una hora de contacto.

Roşca et al. (2024), evaluaron y compararon la capacidad de cuatro biomásas microbianas para remover cadmio en solución acuosa, considerando una dosis constante de biosorbente de 5g/L, pH de 5,4 y 25 °C de temperatura y variando los tiempos de contacto y las concentraciones iniciales de contaminantes, se evaluó la eficiencia del proceso y la capacidad de captación de los biosorbentes. Esta investigación reveló que un tiempo de contacto mayor a 24 h no incrementó significativamente la capacidad de captación ni la eficiencia de remoción de cadmio, por *B. megaterium* o *Geotrichum sp.*, lo que significa que los sitios de unión disponibles en la pared celular participan inmediatamente en la remoción de iones metálicos. Para los otros tres biosorbentes, incrementar el tiempo de contacto de 24 h a 48 h condujo a un aumento significativo en la capacidad de captación y la eficiencia de remoción. La menor capacidad de absorción, así como la menor eficiencia después de 48 h de contacto, se obtuvo para *Geotrichum sp.* con 14,97% y la mayor eficiencia de absorción de cadmio fue de 99.57% con *Cladosporium sp.* en 48 horas de contacto.

Vera et al.(2016), investigaron la eliminación de metales pesados como el plomo y el cadmio de las aguas residuales mineras con bagazo de caña de azúcar, considerando los efectos del pH, el tiempo de contacto y la concentración de la especie metálica, el porcentaje de remoción de cadmio fue de 77.81%, el cual fue obtenido con un pH de 6, en un tiempo de 10 minutos, estos investigadores reportaron que mientras aumentaba la concentración de la especie metálica incrementaba la cantidad de metal adsorbido por gramos de adsorbente.

Si comparamos la remoción de cadmio con bagazo de caña de azúcar con la obtenida en la presente investigación, existe mayor porcentaje de eliminación de cadmio, un factor importante podría ser el pH ya que Vera et al. (2015) evaluaron los valores de pH de 3, 4, 5 y 6, siendo el pH de 5 el que contribuyó a la mayor remoción de cadmio. Durante la investigación realizada con cascarilla de cacao, el pH final en el tratamiento con mayor porcentaje de adsorbente fue de 4.9 a 5.0, y coincide con los mayores porcentajes de remoción de cadmio.

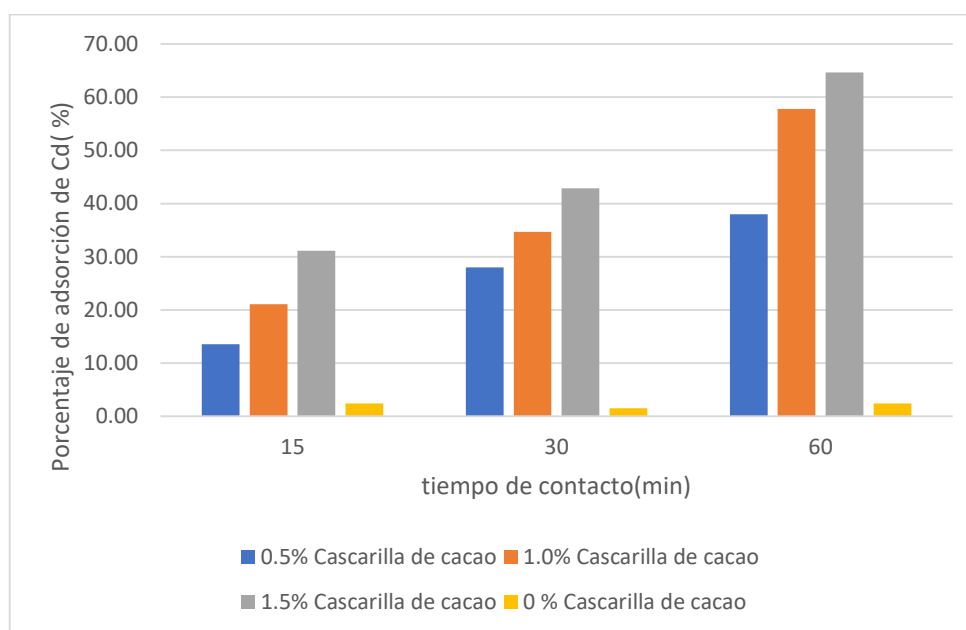


Figura 5. Variación del porcentaje de remoción de cadmio a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de cacao

Se puede observar que conforme incrementa el tiempo de contacto y el porcentaje en peso de la cascarilla de cacao, mayor es el porcentaje de remoción de cadmio.

4.3. Determinación de la influencia de la turbidez, conductividad y el pH en la eficiencia de la remoción de cadmio divalente utilizando cascarilla de cacao

El efecto de la aplicación de la cascarilla de cacao, sobre la conductividad de la solución acuosa, donde el tiempo de contacto y la agitación en la unidad experimental (Tabla 9), permite la solubilidad de algunos componentes de la cascarilla de cacao a lo largo del tiempo de contacto. Por otro lado, se observa el aporte de la conductividad de los iones de cadmio en solución y aquellos propios del agua experimental utilizada.

Tabla 10. Conductividad de la solución de cadmio al término del tratamiento a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de cacao

Trat. (%)	clave	Tiempo de exposición (minutos)		
		15	30	60
0.0	T0	74.00	79.33	79.33
0.5	T1	111.87	191.33	467.00
1.0	T2	215.67	315.00	789.00
1.5	T3	267.67	335.33	1143.33

Vargas-Solano et al.(2022), investigaron la remoción de metales pesados de agua de río con mucílago de *Opuntia ficus I.* , en su análisis sobre la variación de parámetros fisicoquímicos entre ellos la conductividad donde a diferencia de los resultados obtenidos tanto la conductividad y la turbidez disminuyeron después de la remoción de los metales pesados, estos investigadores mencionan que la conductividad, presenta una disminución en casi todas las muestras de agua después del proceso de remoción de metales pesados, con respecto al valor inicial, esta disminución es entre 21 y 528 $\mu\text{S}/\text{cm}$; sin embargo, la primera muestra de agua exhibió un incremento de 106,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos resultados indican una reducción en la concentración de iones metálicos presentes en las muestras de agua; lo cual se atribuye a la eliminación de algunos metales pesados por mucílago. El aumento de la conductividad puede estar relacionado con la presencia de minerales como Na^{2+} , K^+ , Ca^{2+} , estos fueron liberados por el mucílago en el agua durante el proceso de eliminación.

Amna et al. (2021), realizaron un estudio para investigar el efecto de la piel y cáscara de maní tratada con un líquido iónico, sobre la biosorción de cadmio divalente, estos investigadores reportan como resultado una dependencia de la agitación en la adsorción de metales con ILPS (Piel de Maní tratada con Líquido Iónico), ya que se realizaron experimentos a diferentes velocidades de agitación (30-180 rpm). Aquí se utilizó una concentración inicial de cadmio de 20 ppm y una dosis de adsorbente de 40 mg para la experimentación, y se usó 1 h de tiempo de agitación para todos los matraces a temperatura ambiente. Se observó que la adsorción potencial de ILPS para Cd (II) se incrementó significativamente cuando la velocidad de agitación aumentó de 30 a 120 rpm; sin embargo, arriba esta velocidad, el potencial de adsorción disminuyó drásticamente.

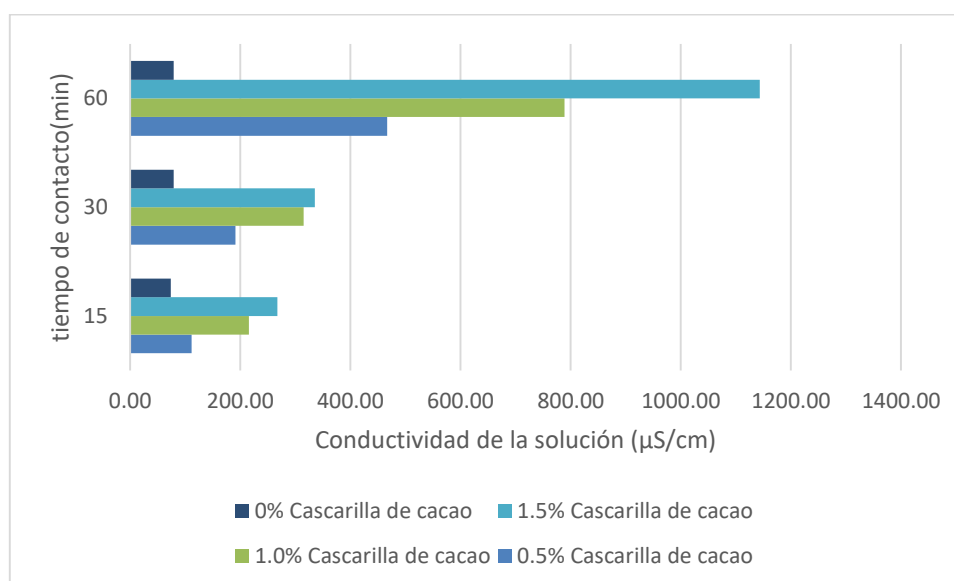


Figura 6. Variación de la conductividad en la solución de cadmio al término del tratamiento a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de cacao.

Se permite visualizar como incrementa la conductividad de la solución, por la solubilidad de componentes presentes en la cascarilla de cacao, la misma que es proporcional al porcentaje en peso aplicado.

Tabla 11. Turbidez de la solución de cadmio al término del tratamiento a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de semilla de cacao

Trat. (%)	clave	Tiempo de exposición (minutos)		
		15	30	60
0.0	T0	6.00	8.00	7.67
0.5	T1	54.00	65.33	70.67
1.0	T2	94.67	102.67	105.00
1.5	T3	131.33	142.00	152.00

En las muestras el comportamiento de la turbidez, la misma que se produce por la dispersión homogénea de sólidos suspendidos de la cascarilla de semilla de cacao (Tabla 10), así como también los sólidos disueltos que en conjunto disminuyen el paso de la luz a través de la solución, que resulta en un incremento de turbidez. Este efecto se relaciona con la eficiencia alcanzada, la cual fue mayor, en el tratamiento con mayor valor de turbidez, de esta manera la absorción se puede desarrollar con mayor eficiencia, debido al contacto que se establece entre

el cadmio que es el contaminante o adsorbato y las partículas de cascarilla de cacao dispersas, que son el adsorbente.

Adewuyi (2020), afirma que durante un proceso de biosorción de compuestos farmacéuticamente activos, las sustancias (adsorbato) en fase fluida interactúan con la fase sólida y se transfieren de la fluida a la fase sólida (biosorbente). Los compuestos farmacéuticamente activos son el adsorbato en la fase fluida, mientras que un material adecuado capaz de interactuar con estos compuestos constituye la fase sólida (biosorbente). El proceso puede llevarse a cabo en lotes (sistemas agitados) o en un sistema de modo continuo (columna de lecho fijo). El proceso implica tres etapas: la primera es el transporte del adsorbato en la fase fluida a la superficie del biosorbente, conocido como difusión de película, la segunda etapa es el movimiento del adsorbato a los poros del biosorbente, o difusión intrapartícula y la tercera fijación del adsorbato en la superficie del biosorbente, unión superficial.

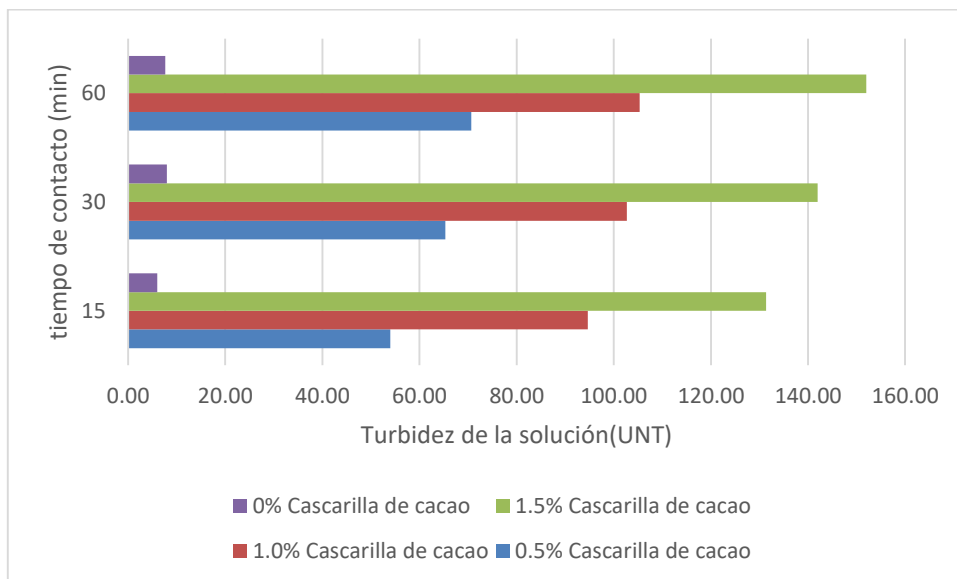


Figura 7. Variación de la turbidez en la solución de cadmio al término del tratamiento a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de cacao.

Nos permite observar la diferencia entre los valores de la turbidez en cada tratamiento (figura 7), es importante mencionar que la variación de la turbidez entre las unidades experimentales con mismo porcentaje en peso de cascarilla de cacao en los diferentes tiempos de contacto no es muy notoria, en comparación con la turbidez impartida por los diferentes porcentajes en peso de la cascarilla de cacao en el mismo tiempo de contacto.

Tabla 12. pH de la solución de cadmio al término del tratamiento a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de cacao

Trat. (%)	clave	Tiempo de exposición (minutos)		
		15	30	60
0.0	T0	6.30	6.20	6.00
0.5	T1	5.97	5.50	5.23
1.0	T2	5.30	5.23	5.00
1.5	T3	5.23	5.03	4.87

El comportamiento del pH, el cual presenta una tendencia a disminuir por efecto del incremento del porcentaje en peso de la cascarilla de cacao, lo cual podría suceder por la presencia de compuestos derivados de ácidos grasos (Tabla 8). Esta condición de acidificación favorece la adsorción de iones de cadmio, ya que permite que estos se mantengan solubles y en condiciones de interactuar con los compuestos proteicos de la cascarilla de cacao.

Arizpe- Diaz et al., (2025), realizaron la evaluación de un sistema de adsorción para remover cadmio divalente utilizando como biosorbentes las cáscaras de plátano, de maní y de naranja, para realizar sus experimentos, debieron investigar acerca del rango de pH al cual debían trabajar, y mencionan que se ha reportado que el pH al cual ocurre la biosorción tiene un impacto significativo en la cantidad de metal pesado biosorbido. Existen investigaciones que reportaron una mejor biosorción de Pb y Cd por cáscara de fruta del dragón, cáscara de rambután y cáscara de maracuyá a pH 4.0, mientras que con biosorbentes a partir de cáscaras de plátano y naranja, se reportó que el pH ideal para la sorción de Co, Cu, Ni y Zn está entre 5.0 y 8.0. A pH muy bajo, el hidrógeno compite con metales pesados por el sitio activo, disminuyendo así la capacidad de sorción del biosorbente. En la biosorción de Cd por medio de cáscaras de plátano, se reportó que el pH con los porcentajes de remoción más altos estaba entre 5.0 y 8.0. Por lo tanto, se decidió utilizar un pH de 5,5 para la biosorción de Cd por las diferentes biomásas, obteniendo mayor remoción de cadmio con la cáscara de maní, con una eficiencia de 59.5%.

Ali (2020), realizó un estudio detallado del proceso de biosorción de metales pesados en medio acuoso, aquí este investigador mencionó que la biosorción de iones metálicos como cobre, cadmio, níquel, cobalto y zinc suele reducirse en condiciones de pH ácido bajo, donde se produce competencia entre los cationes metálicos y los iones hidronio por los sitios de unión del biosorbente. A pH bajo, los grupos funcionales del biosorbente favorecerían a los iones hidronio, ya que estos se encuentran en forma protonada y las fuerzas de repulsión entre estos

y los cationes metálicos impedirían su atracción. Sin embargo, a medida que aumenta el pH, grupos funcionales como los grupos carboxilo, hidroxilo y fosfato comenzarían a experimentar cargas negativas (y los grupos amino e imidazol se volverían neutros) debido a la desprotonación. Esto aumentaría la unión de los cationes metálicos y, por lo tanto, la capacidad y la velocidad de biosorción. Aunque aumentar aún más el pH garantizaría la desprotonación de todos los grupos ácidos, los cationes metálicos libres pueden comenzar a precipitar como hidróxidos metálicos, lo que disminuye la eficiencia de la eliminación del metal. El pH no solo afecta a los grupos funcionales del biosorbente, sino también a la composición química de los iones metálicos afectando la forma del ion metálico presente en solución acuosa y su concentración, lo que resultaría en la formación de diferentes especies de iones metálicos a diferentes niveles de pH.

Se permite visualizar y comparar la variación del pH (figura 8), por efecto de la aplicación de la cascarilla de cacao y la solubilidad de sus componentes que aportan protones y disminuyen el pH de la solución.

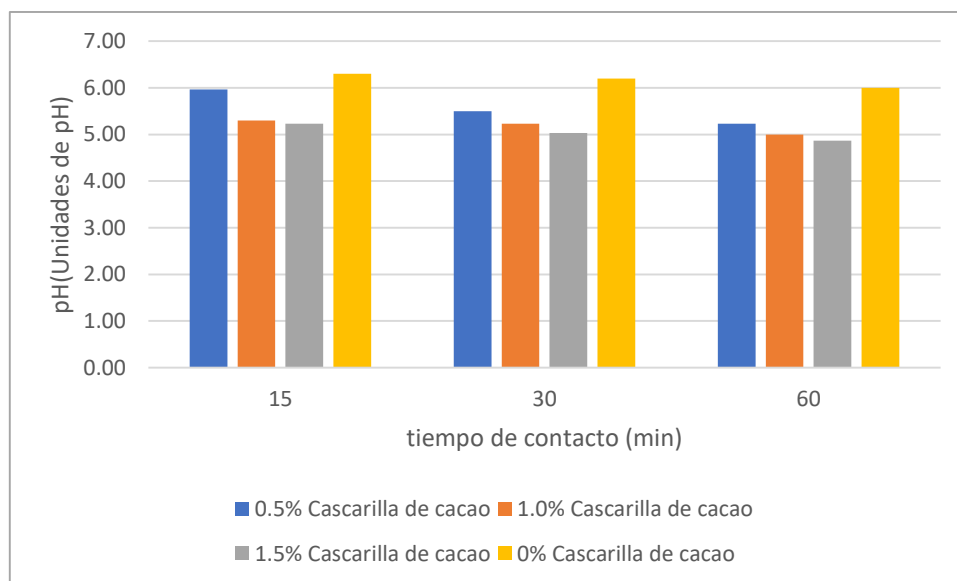


Figura 8. Variación del pH en la solución de cadmio al término del tratamiento a diferentes tiempos y concentraciones de cascarilla de cacao.

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para las diferentes variables en estudio y comparaciones múltiples, con un nivel de significancia del 5 %. Con una prueba de medias de Tukey entre los tratamientos todos los análisis fueron realizados mediante el programa Info Stat, en la cual se pudo observar que existe diferencia significativa entre la remoción de cadmio

de cada tratamiento, a un 95% de intervalo de confianza, es decir tanto el tiempo de contacto como el porcentaje en peso de cascarilla de cacao de cada tratamiento presentaron resultados de porcentaje de adsorción de cadmio con diferencias significativas se puede afirmar que existe una relación positiva entre el porcentaje de adsorción de cadmio y la conductividad y turbidez, siendo mayor para la conductividad, sin embargo, con el pH existe una relación negativa, es decir, a mayor incremento del porcentaje adsorción de cadmio, menor es el pH final de la solución.

V. CONCLUSIONES

La cascarilla de cacao es un material que tiene la capacidad de adsorber el cadmio divalente.

La adsorción de cadmio divalente en solución acuosa con cascarilla de cacao es directamente proporcional al tiempo de contacto entre ambos.

La adsorción de cadmio divalente en solución acuosa es directamente proporcional al porcentaje en peso de cascarilla de cacao utilizada en el proceso.

El porcentaje de adsorción de cadmio divalente con la cascarilla de la semilla de cacao genera un incremento de la conductividad y turbidez de la solución y una tendencia a la reducción del pH.

El máximo porcentaje de adsorción de cadmio con cascarilla de cacao es relativamente bajo comparado con el reportado en otras investigaciones similares.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

La realización de investigaciones de remoción de metales pesados con biosorbentes como la cascarilla de cacao, necesita ser profundizada, realizando pruebas que impliquen un pretratamiento del material, que acondicione su estructura para incrementar su reactividad en la superficie.

El desarrollo de pruebas experimentales en medios ácidos y básicos y la extensión del tiempo de contacto, son parámetros que podrían influir en su eficiencia de biosorción.

Hacer pruebas con la presencia de otros metales pesados para verificar como afecta la eficiencia del proceso de adsorción.

Realizar un pretratamiento a la cascarilla de cacao con el fin de extraer los compuestos grasos, para incrementar su mojabilidad y facilitar su dispersión en el medio acuoso.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbey C., Abudu D., Quainoo A. (2023). Removal of toxic metals from aqueous phase using cacao pod husk biochar in the era of green chemistry. *Applied Water Science*. 13. 8. 10.1007/s13201-022-01863-5.
- Abdullad A.(2019). Operation of a lab-scale Sequencing Batch Reactor (SBR). *CHEN40470: Research Method in Chemical & Bioprocess Engineering*, 12-14.
- Adewuyi A. (2020). Chemically Modified Biosorbents and Their Role in the Removal of Emerging Pharmaceutical Waste in the Water System. *Water*. 12. 1551. 10.3390/w12061551.
- Ali M., Sarkar B., Bhattacharya P., Chatterjee N., Rana S., Rokunuzzaman M. , Bhak J.(2024). Screening and characterization of novel biosorbent for the removal of Cadmium from contaminated water. *Energy Nexus* 13, 100278. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100278>.
- Ali, W.; Bian, Y.; Zhang, H.; Qazi, I.H.; Zou, H.; Zhu, J.; Liu, Z.(2023). Effect of cadmium exposure during and after pregnancy of female. *Environ. Pollut. Bioavailab.* 35, 2181124.
- Amna B., Sadia N., Maliha U. (2021). Evaluación del efecto del líquido iónico en el potencial de biosorción de los desechos de maní: estudios experimentales y teóricos. *ACS Omega* 6 (34), 22259-22271. DOI: 10.1021/acsomega.1c02957.
- Ankush B., Ritambhara S., Lamba R., Prakash(2024). Cadmium in Environment—An Overview: Kumar y Kumar (Eds.). En *Cadmium Toxicity in water, Challenges and solutions*. Editorial Board. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-54005-9>.
- Ansari M., Mahvi AH., Salmani MH., et al. (2018). Removal of Cadmium from Aqueous Solutions by a Synthesized Activated Carbon. *J Environ Health Sustain Dev.* 3(3): 593 - 605. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24766267.2018.3.3.7.2>.
- Arizpe-Díaz, D. O., Gama-Lara, S. A., Roa-Morales, G., Vilchis-Néstor, A. R., Parada-Flores, A., & Balderas-Hernández, P. (2025). Evaluation of Cadmium Removal in an Aqueous Solution by Biosorption in a Batch System with Banana, Peanut, and Orange Husks. *Environments*, 12(4), 97. <https://doi.org/10.3390/environments12040097>.
- Astudillo S., Vera L., Astudillo J., Castro C. (2020), Evaluación del poder biosorbente de la hoja de maíz en la remoción de metales pesados. *Afinidad: Revista de química teórica y aplicada*, 77(591),182-188.

- Bathla S, Jain T.(2016). Heavy Metals Toxicity, *International Journal of Health Sciences and Research*, 6(5)361-368.
- Belwal T., Cravotto C., Ramola S., Thakur M., Chemat F., Cravotto G.(2022). Bioactive Compounds from Cocoa Husk: Extraction, Analysis and Applications in Food *Production Chain. Foods*, 11, 798. <https://doi.org/10.3390/foods11060798>.
- Borrallo C.(2019). Valorización de la cascarilla de cacao, residuo de la industria chocolatera, para su empleo como sustrato en procesos fermentativos. [Tesis de Fin de Master]. Universidad de Oviedo. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/59511/TFM%20MBTA%20CRISTINA%20BORRALLO%20MAYORAL.pdf?sequence=4>.
- Castillo E., Alvarez C., Contreras Y.(2018). Caracterización fisicoquímica de la cáscara del fruto de un clon de cacao (theobroma cacao l.) Cosechados en Caucagua estado Miranda.Venezuela. *Revista de Investigación*, 42(95);154-175.
- Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (2022). *Las propiedades de la cascarilla del grano de cacao* [Figura]. Recuperado de <https://www.ciad.mx/wp-content/uploads/2022/09/LAS-PROPIEDADES-DE-LA-CASCARILLA-DE-GRANO-DE-CACAO-900x450.jpg>.
- El-Refaey A. (2016).Comparative performance of cement kiln dust and activated carbon in removal of cadmium from aqueous solutions, *Water Sci. Technol.: a journal of the International Association on Water Pollution Research* 73 (7)1691–1699.
- Ezzeddine, Z., Batonneau-Gener, I., Ghssein, G., Pouilloux, Y. (2025). Recent Advances in Heavy Metal Adsorption via Organically Modified Mesoporous Silica: A Review. *Water*, 17(5), 669. <https://doi.org/10.3390/w17050669>.
- Feng, L., Wang, E. (2025). Adsorption and Recovery Studies of Cadmium and Lead Ions Using Biowaste Adsorbents from Aqueous Solution. *Separations*, 12(1), 16. <https://doi.org/10.3390/separations12010016>.
- Fouad I. (2014). Surfactant Mediated Cadmium Determination with Dithizone in Aqueous Solution.[Tesis de Maestría en Ciencias en Química].Eastern Mediterranean University. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=039712988761cbc4c6ae093509ec7a54501bdc4d>.
- Gouda S., Taha A. (2023). Biosorption of Heavy Metals as a New Alternative Method for Wastewater Treatment: A Review. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 27(2): 135 – 153.

- Indranil D., Seshagiri R., Prashant N., Shirish S., Sridhar P.(2024). Effluent quality improvement in sequencing batch reactor-based wastewater treatment processes using advanced control strategies. *Water Sci Technol* 89 (10): 2661–2675. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.150>.
- Jha A. K., Kumar N. (2024). *Cadmium Toxicity in Water*, Springer Water, https://doi.org/10.1007/978-3-031-54005-9_1.
- Lavado-Meza, C., De la Cruz-Cerrón, L., Lavado-Puente, C., Gamarra-Gómez, F., Sacari-Sacari, E., & Dávalos-Prado, J. Z. (2023). Effective Removal of Cd(II) from Aqueous Solutions Using *Theobroma cacao* Agro-Industrial Waste. *Molecules*, 28(14), 5491. <https://doi.org/10.3390/molecules28145491>.
- Li G., Dong Zh., Ren Q., Sun B., Liu S., Ma J., Zuo Y.(2024). Investigating the influence of particle hydrophobicity on lung deposition using nonionic dye partitioning. *Nano Today* 57. 102360. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2024.102360>.
- Licare J. (2019). Capacidad de bioadsorción de la cáscara de tuna (*Opuntia ficus indica*) para remover los iones de plomo (II) de una solución acuosa. [Tesis para optar el título de ingeniero forestal y ambiental], Universidad Nacional del Centro del Perú. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5950/T010_46939067_T_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Mariatti F., Gunjević V., Boffa L., Cravotto G.(2021). Process intensification technologies for the recovery of valuable compounds from cocoa by-products. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 68, 102601. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102601>.
- Nur S. , Farrah A., Masitah H., Naimah I., Nabilah A., Raja N., Raja Nazri, Nor A., Achmad S.(2024). The Effects of Particle Size on the Adsorption of Metaldehyde by Oil Palm Kernel Biochar and Rice Husk Biochar. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 14(6), 1-14. <https://doi.org/10.33263/BRIAC146.131>.
- Obaiah J., Vivek B., Padmaja D., Sridhar K. (2020). Cadmium Toxicity Impact On Aquatic Organisms Oxidative Stress: Implications For Human Health, Safety And Environmental Aspects-A Review. *International Journal of Scientific & Technology Research* 9(03)4172-4185.
- Orugba H., Sinebe J., Chukwunke J., Okoro V., Enyi Ch., Ani O.(2024).Adsorption of cadmium from wastewater with activated carbons derived from pig fur biowaste: A comparative study of in-situ and ex-situ activation routes, *Heliyon* 10(18)., <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37768>.

- Pillaca K.(2023). Capacidad de descontaminación de los iones de cadmio (II) mediante los tallos de *Scirpus californicus* en aguas contaminadas. [Tesis para optar el grado de Maestra en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible]. Universidad Nacional del Centro del Perú.
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/9344/T010_46186953_M.pdf?sequence=3&isAllowed=y.
- Pivokonský M., Novotná K., Čermáková L., Petříček R.(2022). *Jar Tests for Water Treatment Optimisation: How to Perform Jar Tests – a handbook*. IWA Publishing. doi: 10.2166/9781789062694_ix.
- Poonam, Rani, A., Sharma, P.K. (2021). Biosorption: Principles, and Applications. In: Gupta, L.M., Ray, M.R., Labhasetwar, P.K. (eds) *Advances in Civil Engineering and Infrastructural Development. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 87. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6463-5_48
- Ran, D.; Zhou, D.; Liu, G.; Ma, Y.; Ali, W.; Yu, R.; Wang, Q.; Zhao, H.; Zhu, J.; Zou, H. (2023). Reactive oxygen species control osteoblast apoptosis through SIRT1/PGC-1 α /P53Lys382 signaling, mediating the onset of Cd-induced osteoporosis. *J. Agric. Food Chem.* 71, 5991–6002.
- Roşca, M., Diaconu, M., Hlihor, R.-M., Cozma, P., Silva, B., Tavares, T.,Gavrilescu, M. (2024). Evaluation of Microbial Biosorbents for Efficient Cd(II) Removal from Aqueous Solutions. *Water*, 16(24), 3660. <https://doi.org/10.3390/w16243660>.
- Sangronis E., Soto M., Valero, Y., Buscema I. (2014). Cascarilla de cacao venezolano como materia prima de infusiones. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* Alan, 8.
- Sattar S., Yahya M., Aslam S., Hussain R., Syed M., Shah M., Rauf Z., Zamir A., Ullah R., Shahzad A.(2025).Environmental occurrence, hazards, and remediation strategies for the removal of cadmium from the polluted environment, *Results in Engineering*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104322>.
- Senthil Kumar, P., Yaashikaa, P. R. (2019). Introduction—Water. *Water in Textiles and Fashion*, 1–20. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102633-5.00001-4>.
- Sheraz, N.; Shah, A.; Haleem, A.; Iftikhar, F.J.(2024). Comprehensive assessment of carbon-, biomaterial- and inorganic-based adsorbents for the removal of the most hazardous heavy metal ions from wastewater. *RSC Adv.*, 14, 11284–11310. doi: 10.1039/d4ra00976b. eCollection 2024 Apr 3.

- Teneda W., Ah-Hen K., Lemus-Mondaca R. (2018). Caracterización de una infusión de cascarilla de cacao (*Theobroma cacao L.*, var. Arriba) con hierbas aromáticas. *Agro Sur* 43(3): 47-55, DOI:10.4206/agrosur.2017.v45n3-07.
- Torres E. (2020). Biosorption: A Review of the Latest Advances, *Processes*, 8, 1584, 1-23. doi:10.3390/pr8121584.
- Vargas-Solano S., Rodríguez-González F., Martínez-Velarde R., Morales-García S., Jonathan M.P.(2022). Removal of heavy metals present in water from the Yautepec River Morelos México, using *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Environmental Advances*,7. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100160>.
- Venon G., Huayta L., Delgado P., Delgado Y., Zumarán R. (2019). Biosorción del metal pesado Cd (II) para el tratamiento de efluentes mineros por medio del alginato de sodio. *Revista Boliviana de Química*,36(4)148-156.
- Vera L., Uguña M., García N., Flores M., Vázquez V. (2016). Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. *Afinidad: Revista de química teórica y aplicada*,73 (573): 43-49.
- Villabona-Ortíz, Á., Tejada-Tovar C., Gonzalez-Delgado, Á. (2021) Adsorption of Cd²⁺ Ions from Aqueous Solution Using Biomasses of *Theobroma cacao*, *Zea mays*, *Manihot esculenta*, *Dioscorea rotundata* and *Elaeis guineensis*. *Appl. Sci.* 11, 2657. <https://doi.org/10.3390/app11062657>.
- Villamizar A., López L. (2017). “Cáscara de cacao fuente de polifenoles y fibra: simulación de una planta piloto para su extracción”, *Respuestas*,22(1)75-83. <https://doi.org/10.22463/0122820X.821>.
- Yang, Y., Hassan, M. F., Ali, W., Zou, H., Liu, Z., Ma, Y. (2025). Effects of Cadmium Pollution on Human Health: A Narrative Review. *Atmosphere*, 16(2), 225. <https://doi.org/10.3390/atmos16020225>.

VIII. ANEXOS

Tabla 13. Concentración final de cadmio después del tratamiento con la cascarilla de semilla de cacao.

Tratamiento	Concentración inicial de Cadmio (mg/L)	Tiempo (min)	Concentración final de Cadmio a dosis diferentes de polvo de cascarilla de cacao (mg/L)			
			0,5 %	1,0%	1,5%	0%
			1R	15	15	13.3
2R	15	15	12.7	11.6	10.2	14.9
3R	15	15	12.9	11.8	10.4	14.3
1R	15	30	10.8	10.1	9.1	14.9
2R	15	30	11.2	9.8	8.2	14.6
3R	15	30	10.4	9.5	8.4	14.8
1R	15	60	9.2	6.9	5.7	14.6
2R	15	60	9.8	5.9	5.3	14.8
3R	15	60	8.9	6.2	4.9	14.5

Tabla 14. Porcentaje de adsorción de cadmio en cada tratamiento con cascarilla de la semilla de cacao

Tratamiento	Tiempo (min)	Porcentaje de adsorción de Cadmio a dosis diferentes de cacao (%)			
		0,5 %	1,0%	1,5%	0%
T1 1R	15	13.3	12.1	10.4	14.7
T1 2R	15	12.7	11.6	10.2	14.9
T1 3R	15	12.9	11.8	10.4	14.3
T1 (PROMEDIO)	15	13.56	21.11	31.11	2.44
T2 1R	30	28.00	32.67	39.33	0.67
T2 2R	30	25.33	34.67	45.33	2.67
T2 3R	30	30.67	36.67	44.00	1.33
T2 (PROMEDIO)	30	28.00	34.67	42.89	1.56
T3 1R	60	38.67	54.00	62.00	2.67
T3 2R	60	34.67	60.67	64.67	1.33
T3 3R	60	40.67	58.67	67.33	3.33
T3 (PROMEDIO)	60	38.00	57.78	64.67	2.44

Tabla 15. Conductividad de la solución de cadmio después del tratamiento con la cascarilla de semilla de cacao.

Tratamiento	Tiempo (min)	Conductividad de la solución en la remoción de cadmio ($\mu\text{S}/\text{cm}$)			
		0,5 %	1,0%	1,5%	0%
T1 1R	15	111.00	214.00	269.00	73.00
T1 2R	15	114.2	215	272	78
T1 3R	15	110.4	218	262	71
T1 (PROMEDIO)	15	111.87	215.67	267.67	74.00
T2 1R	30	187.00	304.00	339.00	81.00
T2 2R	30	195.00	319.00	341.00	78.00
T2 3R	30	192.00	322.00	326.00	79.00
T2 (PROMEDIO)	30	191.33	315.00	335.33	79.33
T3 1R	60	461.0	782.0	1132.0	76.0
T3 2R	60	469.0	795.0	1146.0	79.0
T3 3R	60	471.0	790.0	1152.0	83.0
T3 (PROMEDIO)	60	467.0	789.0	1143.3	79.3

Tabla 16. Turbidez de la solución de cadmio después del tratamiento con la cascarilla de semilla de cacao.

Tratamiento	Tiempo (min)	Turbidez de la solución en la remoción de cadmio (NTU)			
		0,5 %	1,0%	1,5%	0%
T1 1R	15	56.00	98.00	131.00	5.00
T1 2R	15	52	92	128	7
T1 3R	15	54	94	135	6
T1 (PROMEDIO)	15	54.00	94.67	131.33	6.00
T2 1R	30	65.00	99.00	145.00	7.00
T2 2R	30	62.00	102.00	142.00	8.00
T2 3R	30	69.00	107.00	139.00	9.00
T2 (PROMEDIO)	30	65.33	102.67	142.00	8.00
T3 1R	60	71.0	105.0	150.0	7.0
T3 2R	60	69.0	103.0	154.0	7.0
T3 3R	60	72.0	108.0	152.0	9.0
T3 (PROMEDIO)	60	70.7	105.3	152.0	7.7

Tabla 17. pH de la solución de cadmio después del tratamiento con la cascarilla de semilla de cacao.

Tratamiento	Tiempo (min)	pH de la solución en la remoción de cadmio (Unidades de pH)			
		0,5 %	1,0%	1,5%	0%
T1 1R	15	6.20	5.70	5.20	6.30
T1 2R	15	5.8	5.2	5.3	6.1
T1 3R	15	5.9	5	5.2	6.5
T1 (PROMEDIO)	15	5.97	5.30	5.23	6.30
T2 1R	30	5.70	5.10	4.90	6.50
T2 2R	30	5.30	5.40	5.00	6.10
T2 3R	30	5.50	5.20	5.20	6.00
T2 (PROMEDIO)	30	5.50	5.23	5.03	6.20
T3 1R	60	5.3	4.9	4.7	6.1
T3 2R	60	5.2	5.0	4.9	5.9
T3 3R	60	5.2	5.1	5.0	6.0
T3 (PROMEDIO)	60	5.2	5.0	4.9	6.0

1. Análisis de la varianza (Concentración final de cadmio)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Conc. Final Cd (mg/L)	36	0.90	0.89	9.64

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	299.06	5	59.81	55.43	<0.0001
Cascarilla de Cacao(%)	222.65	3	74.22	68.78	<0.0001
Tiempo (min)	76.42	2	38.21	35.41	<0.0001
Error	32.37	30	1.08		
Total	331.43	35			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 1.0790 gl: 30

Cascarilla de Cacao(%)	Medias	n	E.E.	
1.50	8.07	9	0.35	A
1.00	9.32	9	0.35	B
0.50	11.02	9	0.35	C
0.00	14.68	9	0.35	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 1.0790 gl: 30

Tiempo (min)	Medias	n	E.E.	
60.00	8.89	12	0.30	A
30.00	10.98	12	0.30	B
15.00	12.44	12	0.30	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

2. Análisis de la varianza(Porcentaje de adsorción de cadmio)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Adsorción de Cd (%)	36	0.90	0.89	24.60

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	13293.09	5	2658.62	55.29	<0.0001
Cascarilla de Cacao(%)	9894.35	3	3298.12	68.59	<0.0001
Tiempo (min)	3398.74	2	1699.37	35.34	<0.0001
Error	1442.60	30	48.09		
Total	14735.69	35			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 48.0866 gl: 30

Cascarilla de Cacao(%)	Medias	n	E.E.	
0.00	2.16	9	2.31	A
0.50	26.52	9	2.31	B
1.00	37.87	9	2.31	C
1.50	46.22	9	2.31	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 48.0866 gl: 30

Tiempo (min)	Medias	n	E.E.	
15.00	17.06	12	2.00	A
30.00	26.78	12	2.00	B
60.00	40.73	12	2.00	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

3. Coeficientes de correlación

Correlación de Pearson

Variable(1)	Variable(2)	n	Pearson	p-valor
Conc. Final Cd (mg/L)	Cascarilla de Cacao(%)	36	-0.79	<0.0001
Conc. Final Cd (mg/L)	Tiempo (min)	36	-0.48	0.0032
Conc. Final Cd (mg/L)	% Adsorción Cd	36	-1.00	<0.0001
Conc. Final Cd (mg/L)	Cond (Us/cm)	36	-0.90	<0.0001
Conc. Final Cd (mg/L)	Turbidez (NTU)	36	-0.86	<0.0001
Conc. Final Cd (mg/L)	pH	36	0.88	<0.0001
Cascarilla de Cacao(%)	Tiempo (min)	36	0.00	>0.9999
Cascarilla de Cacao(%)	% Adsorción Cd	36	0.79	<0.0001
Cascarilla de Cacao(%)	Cond (Us/cm)	36	0.61	0.0001
Cascarilla de Cacao(%)	Turbidez (NTU)	36	0.99	<0.0001
Cascarilla de Cacao(%)	pH	36	-0.84	<0.0001
Tiempo (min)	% Adsorción Cd	36	0.48	0.0032
Tiempo (min)	Cond (Us/cm)	36	0.63	<0.0001
Tiempo (min)	Turbidez (NTU)	36	0.10	0.5756
Tiempo (min)	pH	36	-0.34	0.0415
% Adsorción Cd	Cond (Us/cm)	36	0.90	<0.0001
% Adsorción Cd	Turbidez (NTU)	36	0.86	<0.0001
% Adsorción Cd	pH	36	-0.88	<0.0001
Cond (Us/cm)	Turbidez (NTU)	36	0.68	<0.0001
Cond (Us/cm)	pH	36	-0.72	<0.0001
Turbidez (NTU)	pH	36	-0.88	<0.0001

Figura 9. Resultados del análisis estadístico de la investigación.

Nueva tabla_2 : 5/10/2025 - 21:46:38 - [Versión : 30/04/2020]

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
% adsorción de Cadmio	36	0.99	0.99	7.78

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo		14718.16	11	1338.01	311.46	<0.0001
dosis de biosorvente		5792.00	3	1930.67	449.42	<0.0001
tiempo		4799.42	2	2399.71	558.61	<0.0001
dosis de biosorvente*tiemp..		4126.74	6	687.79	160.10	<0.0001
Error		103.10	24	4.30		
Total		14821.26	35			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 4.2959 gl: 24

dosis de biosorvente	Medias	n	E.E.	
1.50	39.30	9	0.69	A
1.00	34.76	9	0.69	B
0.50	26.32	9	0.69	C
0.00	6.21	9	0.69	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 4.2959 gl: 24

tiempo	Medias	n	E.E.	
60	40.72	12	0.60	A
30	26.78	12	0.60	B
15	12.44	12	0.60	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Figura 9. Análisis de varianza para el porcentaje de adsorción de cadmio.

Error: 4.2959 gl: 24

dosis de biosorvente tiempo Medias n E.E.

dosis de biosorvente	tiempo	Medias	n	E.E.	
1.50	60	64.67	3	1.20	A
1.00	60	57.78	3	1.20	B
1.50	30	42.89	3	1.20	C
0.50	60	38.00	3	1.20	D
1.00	30	34.67	3	1.20	D
0.50	30	28.00	3	1.20	E
0.00	15	14.63	3	1.20	F
0.50	15	12.97	3	1.20	F G
1.00	15	11.83	3	1.20	F G
1.50	15	10.33	3	1.20	G
0.00	60	2.44	3	1.20	H
0.00	30	1.56	3	1.20	H

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Figura 10. Resultados de la prueba de medias de Tukey.

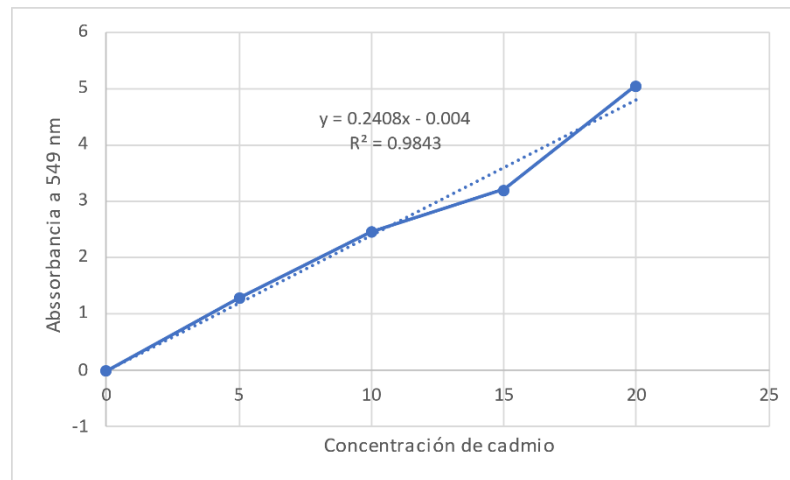


Figura 11. Curva de Calibración para determinación de Cd.



Figura 12. Muestra de cascarilla de semilla de cacao para prueba de humedad



Figura 13. Mufla para prueba de humedad de la cascarilla de semilla de cacao.



Figura 14. Triturado de la cascarilla de la semilla de cacao



Figura15. Pesado de la cascarilla de semilla de cacao molida.



Figura 16. Tamizado de la cascarilla de la semilla de cacao



Figura 17. Tamaño de partículas de cascarilla de semilla de cacao

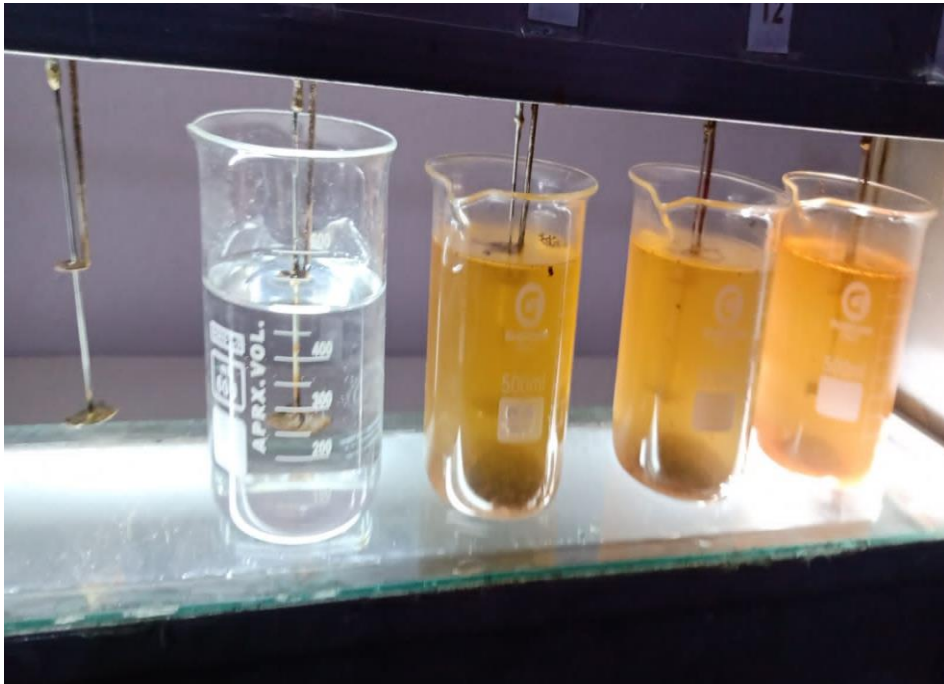


Figura 18. Pruebas experimentales para adsorción de cadmio utilizando el Test de jarras.



Figura 19. Preparación de soluciones de cadmio- ditizona para lectura de cadmio en el espectrofotómetro UV visible.