

# Universidad del Mar

Campus Puerto Ángel



## Uso de coagulantes naturales para la remoción de arsénico presente en agua

**Tesis**

Que para obtener el Título Profesional de:

**Ingeniero Ambiental**

Presenta:

**Jesús Adolfo García Zavaleta**

Directora de tesis:

**M. en C. María del Rocío Gutiérrez Ortiz**

Puerto Ángel, Oaxaca, 2022

## **Dedicatorias**

Dedico este proyecto de tesis a mis padres, Joel y Luisa, como respuesta de su amor y cariño hacia mí. No digo que sus sentimientos tengan el objetivo de ser recompensados, más bien considero que este proyecto es el resultado de su incondicional apoyo hacia mí.

## **Agradecimientos**

A mis padres, Joel y Luisa, quienes con su amor permitieron la realización de este trabajo. A ustedes agradezco mi vida; a ustedes agradezco conocer el amor de Dios.

A mi hermano Raymundo, por llenar mi vida de emociones. Aunque no fuera el perrito que pedí, es lo mejor que me ha pasado en mi vida.

A la Universidad del Mar, por brindarme los recursos necesarios para la realización de este proyecto de investigación.

A la Mtra. María del Rocío Gutiérrez Ortiz, por tener un apoyo y confianza incondicional en el proyecto de investigación. Gracias a ella obtuve el conocimiento y experiencia de lo que es una investigación científica, por lo tanto, siempre estará presente en mi vida académica.

A mis profesores de la carrera de Ingeniería Ambiental; por compartir sus conocimientos que, sin duda, rigen este proyecto de tesis.

A Ana, por brindarme su cariño y apoyo en todo momento; por siempre escucharme y darme su valioso consejo; por los momentos llenos de felicidad.

A mis compañeros de clases, especialmente a Alejandro, Nereidita, Frida, Alexis y Daniela; por su amistad y todos los momentos llenos de risas y desenfrenos.

## Resumen

En el presente trabajo, se realizó la remoción de arsénico en agua mediante el uso de un coagulante natural a base de *Moringa oleifera*. Para la cuantificación de arsénico se implementó un método analítico espectrofotométrico que utiliza la formación del complejo azul de molibdeno, con un límite de detección y cuantificación de  $23 \mu\text{g L}^{-1}$  y  $77 \mu\text{g L}^{-1}$ , respectivamente. Los ensayos de remoción de arsénico en agua, utilizando el coagulante natural (*Moringa oleifera*), permitieron obtener eficiencias de remoción de 41.6 % ( $104 \mu\text{g L}^{-1}$ ) para As(V) y 49.2 % ( $123 \mu\text{g L}^{-1}$ ) para As(III).

## Índice general

1. Introducción .....	1
2. Marco Teórico .....	3
2.1. El arsénico en el agua.....	3
2.2. Química del arsénico.....	3
2.3. Tecnologías convencionales para el tratamiento de agua contaminada con arsénico .....	6
2.3.1. Oxidación química .....	6
2.3.2. Adsorción.....	7
2.3.3. Procesos de membrana.....	7
2.3.4. Precipitación química.....	8
2.4. Coagulación-Floculación .....	8
2.4.1. Fundamentos del proceso coagulación-floculación .....	9
2.4.2. Coagulantes .....	13
2.4.3. Factores que influyen en el proceso de coagulación .....	14
2.5. Métodos analíticos para la determinación de arsénico en el agua .....	15
2.5.1. Método del complejo Azul de Molibdeno para la determinación de arsénico en el agua .....	16
3. Antecedentes.....	19
3.1. Remoción de arsénico en agua para consumo humano mediante el proceso de coagulación-floculación.....	19
3.1.1. Coagulantes naturales.....	20
3.2. Método de azul de molibdeno para la determinación de arsénico en el agua	21
4. Justificación .....	28
5. Hipótesis .....	29

6. Objetivos.....	29
6.1. Objetivo general .....	29
6.2. Objetivos particulares.....	29
7. Metodología.....	30
7.1. Equipos .....	30
7.2. Reactivos .....	30
7.3. Preparación de soluciones .....	31
7.4. Selección y preparación de los coagulantes naturales .....	31
7.5. Determinación de la eficiencia de remoción de turbidez .....	35
7.6. Establecimiento de las condiciones de análisis y calibración del método espectrofotométrico.....	36
7.6.1. Calibración y validación del método .....	37
7.7. Remoción de arsénico utilizando coagulantes naturales.....	38
8. Resultados y discusiones .....	40
8.1. Determinación de la eficiencia de remoción de la turbidez .....	40
8.2. Establecimiento de las condiciones para el método espectrofotométrico y el tratamiento de la muestra .....	43
8.3. Calibración y validación del método espectrofotométrico para la cuantificación de arsénico.....	55
8.4. Remoción de arsénico utilizando coagulante natural .....	57
9. Conclusiones .....	61
10. Recomendaciones .....	62
11. Referencias.....	63

## Índice de Tablas

Tabla 1. Coagulantes naturales seleccionados para el estudio de la remoción de turbidez. ....	32
Tabla 2. Criterios para seleccionar los coagulantes .....	32
Tabla 3. Comparación del efecto de la dosis de coagulante sobre el pH. ....	41
Tabla 4. Datos de concentración y respuesta instrumental para la determinación del intervalo lineal en la determinación de As(V). ....	56
Tabla 5. Resultados de la regresión lineal para la curva de calibración de As(V). 57	

## Índice de Figuras

Figura 1. Distribución de las especies de arsénico en función de pH y Eh (Smedley & Kinniburgh, 2002).....	4
Figura 2. Diagrama de especiación para el As(III) (Fields <i>et al.</i> , 2000).....	5
Figura 3. Diagrama de especiación para el As(V) (Fields <i>et al.</i> , 2000). ....	5
Figura 4. Reacción de ionización de los grupos funcionales amino y carboxilo. ....	9
Figura 5. Imperfección en la red de la superficie de SiO <sub>2</sub> .....	9
Figura 6. Modelo de Stern de la doble capa eléctrica. Modificado de (Bratby, 2016). .....	10
Figura 7. Reducción de la capa difusa (Aguilar <i>et al.</i> , 2002). ....	11
Figura 8. Representación del fenómeno de neutralización de carga (Aguilar <i>et al.</i> , 2002). ....	11
Figura 9. Fenómeno de atrapamiento de una partícula coloidal (P) por un precipitado (Andía, 2000).....	12
Figura 10. Adsorción por puente de las partículas coloidales (Aguilar <i>et al.</i> , 2002). .....	12
Figura 11. Espectros de los complejos de molibdofosfato (curva a) y molibdoarsenato (curva b) obtenidos por el método de azul de molibdeno en soluciones con fosfato y arsenato 5 µM. Los espectros c y d corresponden a la alícuota reducida ([As(V)] = 5 µM) y a la muestra de agua sin adicionar As(V), respectivamente (Tsang <i>et al.</i> , 2007). ....	17
Figura 12. Eficiencia de remoción de turbidez a diferentes dosis de coagulante a pH de 10.0. ....	41
Figura 13. Efecto del pH en la eficiencia de remoción de la turbidez. ....	42
Figura 14. Valores de absorbancia a lo largo del tiempo, para muestras con diferente cantidad de As(V), utilizando el método propuesto por Tsang <i>et al.</i> 2007. Las muestras contenían 0 (M1), 100 (M2), 200 (M3) y 500 (M4) µg L <sup>-1</sup> de As(V). ....	43
Figura 15. Espectros de absorbancia de las muestras de As(V) a 0 (M1), 100 (M2), 200 (M3) y 500 µg L <sup>-1</sup> (M4), utilizando el método propuesto por Tsang y colaboradores (2007). ....	44

Figura 16. Regresión lineal de los valores de absorbancia de muestras con As(V) a diferentes concentraciones, utilizando el método propuesto por Tsang y colaboradores (2007) con un tiempo de reacción de 45 min.....	44
Figura 17. Espectros de absorbancia como resultado del experimento de reducción de As(V) utilizando como agente reductor tiourea. M1) Muestra acidificada con P(V) 5 $\mu\text{M}$ ; M2) Muestra acidificada con P(V) 5 $\mu\text{M}$ y As(V) 500 $\mu\text{g L}^{-1}$ ; M3) Muestra acidificada con P(V) 5 $\mu\text{M}$ y As(V) 500 $\mu\text{g L}^{-1}$ sometida a tratamiento con tiourea; M4) Muestra sin acidificar con P(V) 5 $\mu\text{M}$ y As(V) 500 $\mu\text{g L}^{-1}$ sometida a tratamiento con tiourea.....	46
Figura 18. Formación de color, a través del tiempo, en una muestra con As(V) sometida a reducción con tiourea. M1) Muestra acidificada con una concentración de P(V) 5 $\mu\text{M}$ y As (V) 500 $\mu\text{g L}^{-1}$ sometida a reducción con tiourea al 10 %; M2) Muestra acidificada con una concentración de P(V) 5 $\mu\text{M}$ . .....	47
Figura 19. Espectros de absorbancia en la oxidación de As(III) a As(V) utilizando tres agentes oxidantes. M1) Muestra blanco con P(V) 5 $\mu\text{M}$ ; M2) Muestra con P(V) 5 $\mu\text{M}$ , As(V) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ y As(III) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ ; M3) Muestra con P(V) 5 $\mu\text{M}$ , As(V) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ y As(III) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ sometida a oxidación con $\text{KMnO}_4$ ; M4) Muestra con P(V) 5 $\mu\text{M}$ , As(V) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ y As(III) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ sometida a oxidación con $\text{KBrO}_3$ ; M5) Muestra con P(V) 5 $\mu\text{M}$ , As(V) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ y As(III) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ sometida a oxidación con $\text{KIO}_3$ .....	48
Figura 20. Variación de la concentración de permanganato de potasio para la oxidación de As(III) a As(V). M1) Muestra blanco con P(V) 2.5 $\mu\text{M}$ ; M2) Muestra con P(V) 5 $\mu\text{M}$ y As(III) 500 $\mu\text{g L}^{-1}$ .....	49
Figura 21. Tratamiento de oxidación de As (III) y As(V) presentes en una muestra que contenía coagulante natural. M1) Muestra blanco con coagulante natural 500 $\text{mg L}^{-1}$ ; M2) Muestra con coagulante natural 500 $\text{mg L}^{-1}$ , As(III) 500 $\mu\text{g L}^{-1}$ y As(V) 500 $\mu\text{g L}^{-1}$ , oxidada con diferentes concentraciones de permanganato de potasio. ....	51
Figura 22. Formación de color, utilizando HCl como ácido fuerte, en muestras que contenían P(V) 5 $\mu\text{M}$ y As(V) a diferentes concentraciones. ....	53

Figura 23. Oxidación de As(III) a diferentes concentraciones utilizando permanganato de potasio 0.3 mM. M1) Muestra blanco con P(V) 5 $\mu$ M; M2) Muestra con P(V) 5 $\mu$ M, As(V) 500 $\mu$ g L <sup>-1</sup> y diferentes concentraciones de As(III). ....	53
Figura 24. Oxidación de As(III) a diferentes concentraciones utilizando permanganato de potasio 0.3 mM y tiourea al 10.8 % (m/v). M1) Muestra blanco con P(V) 5 $\mu$ M; M2) Muestra con P(V) 10 $\mu$ M, As(V) 500 $\mu$ g L <sup>-1</sup> y diferentes concentraciones de As(III).....	55
Figura 25. Curva de calibración para determinación de la linealidad en la determinación de As(V).....	56
Figura 26. Remoción de As(V) variando la dosis de coagulante natural en una muestra que contenía 250 $\mu$ g L <sup>-1</sup> de As(V) a pH 7. ....	58
Figura 27.Efecto del pH en la remoción de As(V) y As(III) a 250 $\mu$ g L <sup>-1</sup> , utilizando una dosis de 250 mg L <sup>-1</sup> de coagulante natural a base de semillas de moringa. ..	59