

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 ₂ | 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 ⁻¹ 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 ⁻¹ (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 μM ; M2) Muestra acidificada con P(V) 5 μM y As(V) 500 $\mu\text{g L}^{-1}$; M3) Muestra acidificada con P(V) 5 μM y As(V) 500 $\mu\text{g L}^{-1}$ sometida a tratamiento con tiourea; M4) Muestra sin acidificar con P(V) 5 μM 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 μM 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 μM | 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 μM ; M2) Muestra con P(V) 5 μM , As(V) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ y As(III) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$; M3) Muestra con P(V) 5 μM , As(V) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ y As(III) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ sometida a oxidación con KMnO_4 ; M4) Muestra con P(V) 5 μM , As(V) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ y As(III) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ sometida a oxidación con KBrO_3 ; M5) Muestra con P(V) 5 μM , As(V) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ y As(III) 250 $\mu\text{g L}^{-1}$ sometida a oxidación con 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 μM ; M2) Muestra con P(V) 5 μM 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 mg L^{-1} ; M2) Muestra con coagulante natural 500 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 μM 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 μ M; M2) Muestra con P(V) 5 μ M, As(V) 500 μ g L ⁻¹ 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 μ M; M2) Muestra con P(V) 10 μ M, As(V) 500 μ g L ⁻¹ 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 μ g L ⁻¹ de As(V) a pH 7. | 58 |
| Figura 27.Efecto del pH en la remoción de As(V) y As(III) a 250 μ g L ⁻¹ , utilizando una dosis de 250 mg L ⁻¹ de coagulante natural a base de semillas de moringa. .. | 59 |