

## Estudio del grado de funcionalización de quitosano modificado con ácidos carbamoilcarboxílicos como potenciales floculantes en la remoción de metales pesados.

Christian L. Castro-Riquelme<sup>a</sup>, Adrián Ochoa-Terán<sup>b</sup>, Eduardo Alberto López-Maldonado<sup>a\*</sup>, Sergio Pérez-Sicairos.<sup>b</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias químicas e ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, CP 22390, Baja California, Tijuana, México.

<sup>2</sup>Centro de Graduados e Investigación en Química, Tecnológico Nacional de México/ITT, CP 22430, Baja California, Tijuana, México.

E-mail de autor responsable: elopez92@uabc.edu.mx

Recibido 12 de diciembre 2023, Aceptado 20 de diciembre 2023

### Resumen

El objetivo de este trabajo es disminuir el costo del proceso actual de remoción de metales pesados en aguas residuales, sin generar contaminantes secundarios, utilizando un biomaterial de quitosano con la incorporación de ácido carbamoilcarboxílico (ACC) para su aplicación como floculantes y coagulantes. Los compuestos de quitosano fueron modificados variando el número de equivalentes de ACC (0.8, 5 y 10 eq) mostraron un aumento en la solubilidad con el grado de modificación a diferentes valores de pH, destacando en medio alcalino. Los análisis de potencial  $\zeta$  a diferentes pH indicaron que hay una disminución de la carga superficial del quitosano al incorporar los ACC destacando **1c** y **1d**. Además de presentar un desplazamiento del punto isoeléctrico lo cual favorece las interacciones con una mezcla de metales. En las pruebas de jarras realizadas con quitosano modificado con **1a** con una mezcla cationes a 100 ppm ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Cd}^{2+}$ ) de 0.1 a 1 g/L a un valor de pH. de 3.8. Las remociones fueron de 71.6 a 98.69% con mejores resultados que el quitosano sin modificar, además de presentar un efecto más marcado en el aumento de remoción con la concentración de Q-ACC indicando que puede haber una mejora significativa al controlar parámetros como dosis, pH y número de equivalentes de CBA óptimos.

### Abstract

The objective of this work is to reduce the cost of the current process of removing heavy metals in wastewater, without generating secondary contaminants, using a chitosan biomaterial with the incorporation of carbamoilcarboxylic acid (ACC) for its application as flocculants and coagulants. The chitosan compounds were modified by varying the number of equivalents of ACC (0.8, 5 and 10 eq) showing an increase in solubility with the degree of modification at different pH values, highlighting alkaline medium. The  $\zeta$  potential analyzes at different pH indicated that there is a decrease in the surface charge of chitosan when incorporating the ACCs, highlighting **1c** and **1d**. In addition to presenting a shift in the isoelectric point which favors interactions with a mixture of metals. In jar tests carried out with **1a** modified chitosan with a mixture of cations at 100 ppm ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$ ) from 0.1 to 1 g/L at a pH value. of 4.5. The removals were from 71.6 to 98.69% with better results than unmodified chitosan, in addition to presenting a more marked effect in the increase in removal with the concentration of Q-ACC indicating that there may be a significant improvement when controlling parameters such as dose, pH and number of optimal CBA equivalents.

**Palabras clave:** Floculación-coagulación, quitosano modificado, ácidos carbamoilcarboxílicos, metales pesados.



## 1. Introducción

El agua es un recurso fundamental para el desarrollo de las actividades humanas y para los ecosistemas; sin embargo, su disponibilidad y remediación aún son limitadas, especialmente en los países en vías de desarrollo.[1] En casos extremos no hay agua potable disponible, para actividades domésticas o de riego, [2] las principales razones son las actividades industriales, agrícolas, el cambio climático y las limitaciones en los tratamientos de aguas contaminadas. [3]

Los principales contaminantes del agua son compuestos orgánicos, contaminantes emergentes y metales pesados.[4] Los metales pesados son contaminantes que generan muchos problemas de salud y en el medio ambiente, porque tienden a bioacumularse, provocando problemas metabólicos y pueden ser cancerígenos. [5]

Los métodos actuales de eliminación de iones metálicos son precipitación,[6] coagulación,[7] membrana de intercambio iónico,[8] ósmosis inversa, adsorción con materiales naturales y procesos de filtración [9]. Los procesos de floculación-coagulación han ido creciendo exponencialmente en últimos años por su relativo bajo costo, eficiencia y especificidad.

Los polímeros naturales y sintéticos son los más estudiados como floculantes o absorbentes, debido a su alta velocidad de formación de flóculos a baja temperatura, alta área superficial y capacidad de adsorción.[10] El quitosano es uno de los más estudiados como floculantes o absorbentes debido a su nula o baja toxicidad, respuesta a estímulos externos (temperatura, pH o medio), alta superficie superficial y por ser biodegradable. Sin embargo, existen algunas limitaciones para la adsorción e interacción con los contaminantes debido a su baja solubilidad y limitado intervalo de trabajo. Estas limitaciones pueden suprimirse con modificaciones estructurales mediante la funcionalización de los grupos amina e hidroxilo.[11]

Las modificaciones más comunes son injertos, entrecruzamientos, soportes y modificaciones químicas según los contaminantes.[12] Por otro lado, los ácidos bis carbamoilcarboxílicos modificados con aminas presentan una carga negativa a  $\text{pH} > 3$  lo que favorece la remoción de cationes, presentando alta sensibilidad hacia  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$  y  $\text{Cu}^{2+}$ . [13] Sin embargo, presentan limitada interacción con cationes debido a su tamaño (1:1) para superar estas limitaciones, se han realizado modificaciones químicas del quitosano con ácidos bis carbamoilcarboxílicos (bCCA) aumentando la interacción con diferentes cationes ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Al}^{3+}$ ) y los porcentajes de remoción alcanzando valores de hasta el 99%. [14] sin embargo los tiempos de floculación y clarificación de la muestra aún son mayores a 6 h y las concentraciones necesarias son relativamente altas (0.87 g/L) por esta razón en este trabajo se prepararon nuevos biomateriales a base de quitosano modificado con ácidos carbamoilcarboxílicos (ACC), para mejorar sus propiedades fisicoquímicas y eficiencia disminuyendo el tiempo de floculación y clarificación con menor cantidad de quitosano en el proceso de eliminación de iones metálicos de floculación-coagulación.

## 2. Parte experimental

### 2.1 Materiales

Todos los reactivos fueron comprados de Merck (Sigma-Aldrich) y fueron empleados como se recibieron sin purificaciones

posteriores. Nitrato de cobre hidratado ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ , 99.9%), Nitrato de calcio tetrahidratado, ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 99.0%), Nitrato de níquel hexahidratado ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 97.0%), nitrato de zinc hexahidratado ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 98.0%), nitrato de plomo ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ , 99.0%), nitrato de cobalto hexahidratado ( $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 98.0%), hidróxido de sodio (NaOH, 98.0%), ácido clorhídrico (HCl, 37%), 3-picolilamina ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2$ , 99.0%), 2-aminometilpiridina ( $\text{C}_7\text{H}_{10}\text{N}_2$ , 99.0%), 2-aminobencilamina ( $\text{H}_2\text{NC}_6\text{H}_4\text{CH}_2\text{NH}_2$ , 99.0%), 3-aminobencilamina ( $\text{H}_2\text{NC}_6\text{H}_4\text{CH}_2\text{NH}_2$ , 99.0%), dianhídrido 3,3',4,4'-benzofenonatetracarboxílico ( $\text{C}_{17}\text{H}_6\text{O}_7$ , 98.0%), quitosano de bajo peso molecular (peso molecular promedio 1524 g/mol, 75-85% desacetilación).

### 2.1 Mediciones

Los espectros de RMN  $^1\text{H}$  fueron medidos en un equipo de 400 MHz Bruker Advance III, las muestras fueron disueltas en DMSO- $d_6$  y  $\text{D}_2\text{O}$  con DCl con TMS como estándar interno. Los espectros de infrarrojo fueron obtenidos en un espectrofotómetro FTIR Perkin Elmer Spectrum 400 en un intervalo de 4000 a 600  $\text{cm}^{-1}$ . La concentración de cationes en solución acuosa fue medida con un Espectrómetro de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP) Perkin Elmer 5300 DV. El potencial  $\zeta$  fue medido con un Stabino Particle Metrix GmbH A0207.

### 2.3 Síntesis de ácidos carbamoilcarboxílicos

La síntesis de cuatro ACC modificados con aminas distintas se realizó a partir de la modificación del dianhídrido 3,3',4,4'-benzofenonatetracarboxílico. La modificación se realizó con 2-aminobencilamina (**1a**, Figura 1), 3-aminobencilamina (**1b**), 3-picolinamina (**1c**) y 2-aminometilpiridina (**1d**). En un matraz de fondo redondo de 100 mL se agregarán 100 mg (0.31 mmol) de dianhídrido 3,3',4,4'- benzofenonatetracarboxílico con ACN seco como solvente. Posteriormente se agregó gota a gota 0.75 eq de la amina correspondiente y se mantuvo en agitación por cuatro horas. Se eliminó el solvente a presión reducida, se purificó y caracterizó por distintas técnicas espectroscópicas (RMN, Masas, IR).

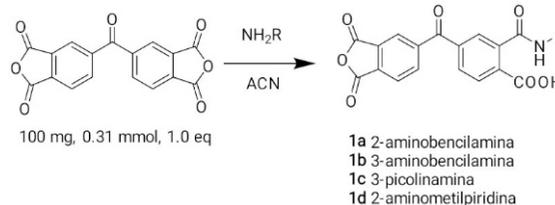


Figura 1. Método de síntesis de serie de ácidos carbamoilcarboxílicos modificados con aminas distintas.

### 2.4. Modificación de quitosano con dianhídrido 3,3',4,4'-benzofenonatetracarboxílico modificado

La modificación de quitosano con ACC con aminas distintas se llevó a cabo en un matraz de fondo redondo de 50 mL con 100 mg de quitosano en ácido acético al 0.7%. Posteriormente se agregó gota a gota diferentes números de equivalentes de ACC (0.8, 5 y 10 eq), con la finalidad de estudiar el grado de funcionalización del quitosano. La reacción se mantuvo en agitación durante 24 h y transcurrido el tiempo se modificó el pH de la solución para obtener un valor de 6 y realizar lavados con agua, etanol y acetona.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Discusión

##### 3.1.1 Síntesis y caracterización

La síntesis de los ACC **1a**, **1b**, **1c** y **1d** se realizó siguiendo la metodología reportada por Martínez-Quiroz y colaboradores con algunas modificaciones.<sup>13</sup> La reacción se fue llevada cabo con éxito en condiciones experimentales controladas (Figura 1). Los productos fueron obtenidos con buenos rendimientos (92, 87, 90 y 82% para **1a**, **1b**, **1c** y **1d** respectivamente). Los compuestos obtenidos son solubles en metanol, ACN, acetona, DMSO y agua. Los espectros FTIR presentan diferentes bandas de estiramiento C=O correspondientes a los grupos funcionales anhídrido, cetona, ácido e imida que están presentes en la molécula desde 1688 a 1580  $\text{cm}^{-1}$ . También se observan las bandas de estiramiento y flexión del enlace NH a 3110 y 1525  $\text{cm}^{-1}$  respectivamente, lo que indica la presencia del grupo amida del sustituyente incorporado (Figura 2).

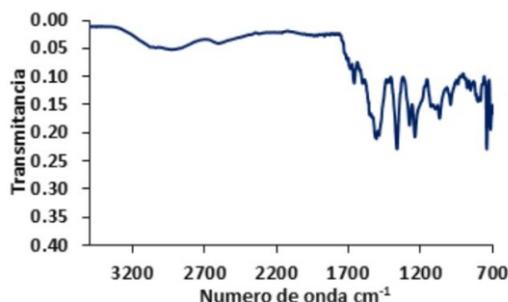


Figura 2. Espectro FTIR de **1a**.

Los espectros de  $^1\text{H}$  NMR de los mCCA muestran las tres señales características de la estructura central de benzofenona (8,60, 8,24, 8,04  $\pm$  1.2 ppm) y las cuatro señales de hidrógeno del sustituyente **1a** en 7,91, 7,87, 7,48 y 7,42 ppm correspondientes a la piridina y la señal de amina en 4,22 ppm (espectro representativo Figuras 3). La integración de las señales indica la formación de los ACC mono sustituidos y no de los bis-sustituidos.

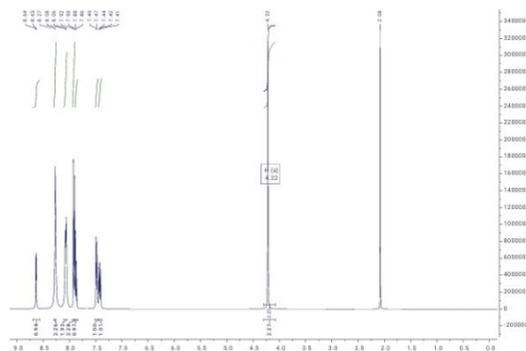


Figura 3. RMN  $^1\text{H}$  de **1a** en  $\text{DMSO-d}_6$ .

La modificación de quitosano con diversos equivalentes de ACC fue analizada por IR observando cambios en las bandas de flexión y estiramiento (Figura 4) aumentando considerablemente las bandas de estiramiento C=O que se encuentran presentes en los ACC, este cambio es proporcional al número de equivalentes de ACC, la modificación química de quitosano también propicio un aumento de solubilidad del quitosano principalmente en medio

alcalino.

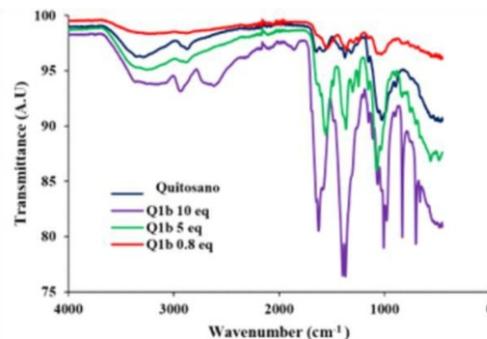


Figura 4. Espectros FTIR de los materiales de quitosano modificados con diversos equivalentes de ACC.

##### 3.1.2 Estudios de potencial $\zeta$ de los ACC.

La desestabilización de los cationes contaminantes se da principalmente por efectos de neutralización de carga y por crecimiento de partículas hasta propiciar su precipitación por lo que se realizó un análisis de potencial  $\zeta$  de los ACC libres en un intervalo de pH de 2 a 12 (Figura 5). Posteriormente se realizó el mismo análisis para los materiales de quitosano modificado con la finalidad de conocer su carga superficial y su capacidad de interacción con cationes distintos. La concentración de ACC y quitosano modificado fue de 1g/L empleando una solución 0.1 M de NaOH para modificar el pH de la solución. En el análisis de potencial de los ACC libres se observó un potencial inicial positivo el cual va disminuyendo conforme se realizaron adiciones de alícuotas de NaOH 0.1. Los ACC tienen un potencial negativo a valores  $>4.5$  y el compuesto modificado con 2-aminobencilamina es el que presenta un mayor intervalo de potencial negativo con un punto isoeléctrico (PIE) de 3.2, además de presentar el valor más grande de carga superficial negativa de los cuatro materiales, lo que genera una mayor interacción electrostática y desestabilización de cationes.

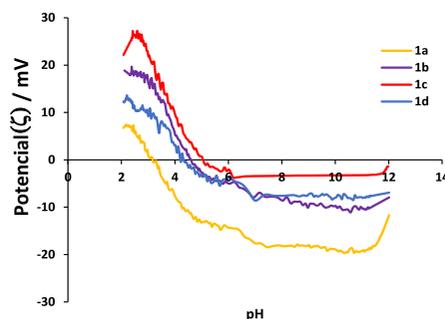
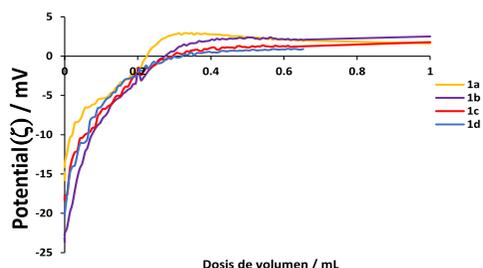


Figura 5. Análisis de potencial  $\zeta$  en función del pH empleando una concentración de ACC de 1g/L en un intervalo de pH de 2 a 12.

El estudio de interacción entre cationes y ACC se realizó empleando una solución de ACC 1g/L a pH inicial de 2.5 y se realizaron alícuotas de 6  $\mu\text{L}$  de una mezcla de cationes ( $\text{M}^+$ ) con concentración de 100 ppm de  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Al}^{3+}$  hasta alcanzar el punto isoeléctrico de la solución, para analizar la dosis óptima de cationes para llegar al punto isoeléctrico y desestabilizar los ACC con la solución  $\text{M}^+$ , permitiendo una mayor remoción. El estudio (Figura 6) permitió determinar la sensibilidad que tienen los ACC, los cuatro materiales presentaron un comportamiento similar requiriendo un

volumen menor a 300  $\mu\text{L}$  de solución presentando una mayor sensibilidad el compuesto **1a**. El resultado se debe a que es el ACC con un potencial negativo mayor, lo que favorece la atracción electrostática con los cationes, una mayor desestabilización, crecimiento de las partículas y una mayor formación de precipitados que el resto de ACC.



**Figura 6.** Análisis de potencial  $\zeta$  en función del volumen de cationes a 100 ppm ( $\text{M}^+$ ) empleando una concentración de ACC de 1g/L con pH inicial de 2.5.

### 3.1.3 Estudios de potencial $\zeta$ de los materiales de quitosano modificado.

El mismo análisis fue realizado para los materiales de quitosano modificado con **1a** (Figura 7a), **1b** (Figura 7b), **1c** (Figura 7c) y **1d** (Figura 7d) con 0.8, 5 y 10 eq a una concentración de 1g/L en un intervalo de pH de 2 a 12 modificado con alícuotas de 6  $\mu\text{L}$  de una solución de NaOH 0.1. En los resultados obtenidos se observaron cambios en los potenciales iniciales y en el PIE de los distintos materiales de acuerdo al grado de funcionalización tomando como referencia al quitosano sin modificaciones. En el caso de **Q-1a** existe una tendencia, al tener un mayor grado de funcionalización el potencial máximo del material disminuye (Figura 7a) pasando de 70 a 45 mV, lo que podría disminuir los posibles efectos de repulsión entre partículas y también con los cationes contaminantes favoreciendo las interacciones por adsorción o por formación de complejos.

Todos los materiales de quitosano modificado presentan un potencial menor al del quitosano sin modificar y un PIE menor. El material con mayor desplazamiento del punto isoeléctrico es el modificado con 2-aminometilpiridina, el cual presenta una mayor cantidad de grupos funcionales ionizables. El cambio de potencial  $\zeta$  y PIE entre los materiales modificados con 5 y 10 eq no es tan notorio que podría deberse a una saturación de grupos funcionales en la superficie de los materiales de quitosano.

Los estudios de cambio de potencial del material de quitosano modificado en función de la concentración de cationes (Figura 8) se estudió una solución de ACC 1g/L a pH inicial de 3.5 y se realizaron alícuotas de 6  $\mu\text{L}$  de una mezcla de cationes ( $\text{M}^+$ ) con concentración de 100 ppm de  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Al}^{3+}$ . El análisis se realizó con el material que presentó el mayor cambio de potencial en función del pH y solubilidad (**Q-1a**). En el análisis realizado el potencial inicial es positivo presentando un potencial menor con 5 eq de ACC hasta tres veces menor que el de quitosano sin modificar, lo que disminuye los efectos de repulsión entre partículas favoreciendo las interacciones con los cationes. Los diversos materiales presentan una disminución del potencial conforme se adicionan alícuotas de la solución de cationes a pesar de que los cationes presentan una carga positiva, además al final de la titulación la solución presenta un cambio de pH de 3.5 a  $2.7 \pm 0.3$  para los diversos materiales. Los

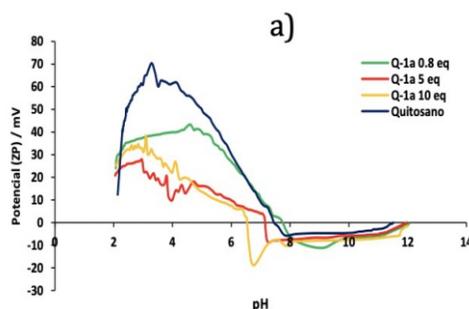
cambios en el pH y la disminución de potencial indican que durante el proceso de adsorción e interacción entre **Q-1a** y los cationes existe un proceso de competencia entre los grupos funcionales protonados ( $\text{COOH}$ ,  $\text{NH}_2$ ,  $\text{CONH}$ , etc) y los cationes de la solución, liberando los protones al medio y cambiando el pH.

## 3.2 Resultados

### 3.2.1. Pruebas de remoción de cationes en procesos de floculación

En las pruebas preliminares se probó quitosano como referencia y **Q-1a** en la floculación y remoción de cationes contaminantes ( $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$  y  $\text{Ni}^{2+}$ ). Las pruebas se realizaron en un volumen de 10 mL de agua con una concentración de cationes (cada uno) de 100 ppm y una concentración de floculante de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 y 1.0 g/L a un pH de 3.8. A la solución que contenía los cationes se les adicionó la correspondiente cantidad de floculante y se mantuvo en agitación durante 2 min, posteriormente se dejó reposar y se filtró después de 24 h para separar los sólidos sobrenadantes de la parte líquida, la parte líquida fue analizada para determinar las concentraciones de cationes por ICP.

Durante el proceso de agitación se visualizó como el floculante **Q-1a** se disolvía y posteriormente interaccionaba con los metales floculando rápidamente formando precipitados en el fondo de los viales, algo que no fue observado en el caso del quitosano el cual no se disolvió completamente, siendo esta una de las limitantes del quitosano sin modificar ya que su aplicación en procesos industriales requeriría pasos previos, como calentamiento, modificación de pH y tiempos de estabilización para ser aplicado, mientras que al tener el material modificado puede ser empleado de forma inmediata, observándose resultados a simple vista, además el tamaño de partícula afecta el área superficial limitando la cantidad de cationes que pueden interaccionar en la superficie del material.



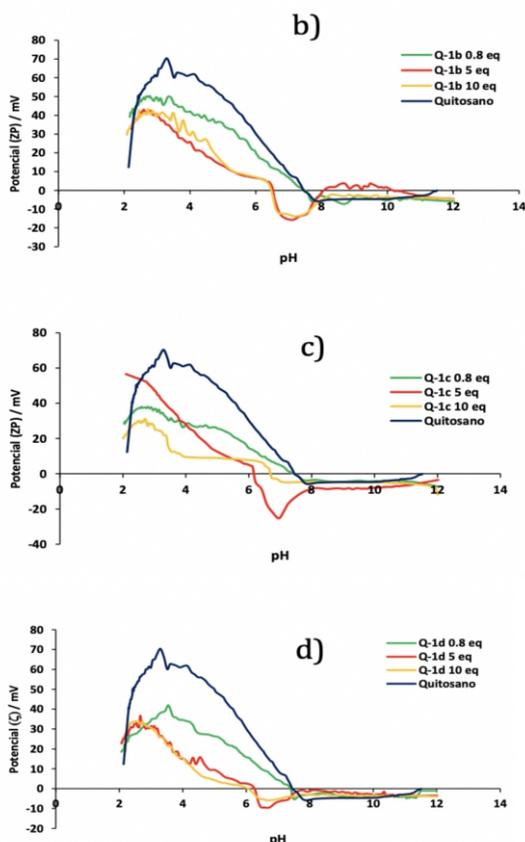


Figura 7. Análisis de potencial  $\zeta$  en función del pH empleando una concentración de quitosano modificado de 1g/L en un intervalo de pH de 2 a 12. Quitosano modificado con a) 2-aminobencilamina, b) 3-aminobencilamina, c) 3-picolinamina, d) 2-aminometilpiridina.

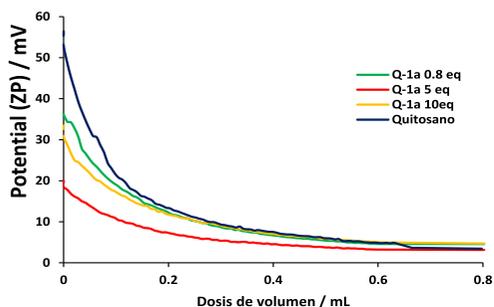


Figura 8. Análisis de potencial  $\zeta$  en función del volumen de cationes a 100 ppm ( $M^{-1}$ ) empleando una concentración de Q-1a de 1g/L con pH inicial de 2.5.

Después de 24 h de estabilización los floculantes precipitaron, en el caso del quitosano sin modificar se observa que la adsorción de los metales es solo superficial viéndose un cambio de color posiblemente por la interacción con alguno de los cationes, el cambio en coloración se intensifica conforme se adiciona una mayor cantidad de quitosano a la solución, aumentando también la cantidad de precipitado.

Por otra parte, con Q-1a se observa la formación de coágulos con distintas morfologías en donde la interacción con los metales puede ser tanto superficial como interna por formación de complejos observándose una mayor intensidad en la coloración al tener una mayor cantidad de floculante, además de un precipitado de mayor volumen.

Las soluciones acuosas después de la filtración fueron analizadas por ICP para determinar el contenido metálico después de la interacción con los floculantes y de esa manera se calculó el porcentaje de remoción.

En los análisis realizados por ICP para Q-1a (Figura 9) se observaron remociones de cationes superiores al 70 % con una concentración 0.1 g/L de Q-1a con excepción de  $Pb^{2+}$  indicando una alta sensibilidad para estos elementos. Las remociones de  $Pb^{2+}$  requiere de concentraciones mayores para obteniendo porcentajes de hasta el 72% (Tabla 1), indicando una menor sensibilidad que podría estar relacionado con la adsorción del material y su porosidad, al ser un catión de mayor tamaño que el resto se requiere una mayor cantidad de floculante para removerlo.

Tabla 1. Remoción porcentual máxima de cationes distintos a una concentración inicial de 100 ppm empleando Q-1a.

Catión	% de remoción
Pb (II)	72.24
Cd (II)	71.59
Cr (III)	81.52
Cu (II)	87.82
Ni (II)	76.70
Ca (II)	93.57
Zn (II)	89.34
Al (III)	98.69

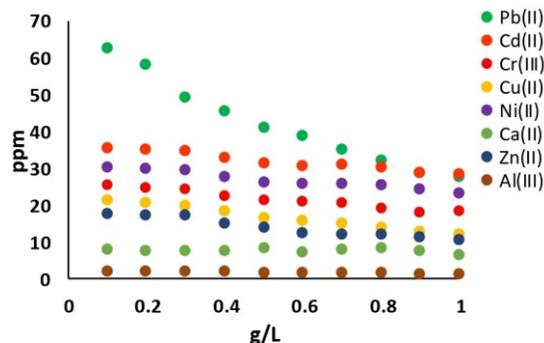
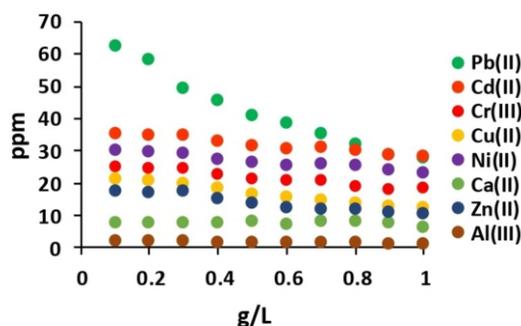


Figura 9. Contenido de cationes analizado por ICP, después del proceso de floculación en función de la concentración de Q-1a.

En los análisis de remoción realizados en ICP para quitosano sin modificaciones (Figura 10) se obtuvieron porcentajes de remoción ligeramente inferiores al material Q-1a, la mayor diferencia en remoción se obtuvo para  $Pb^{2+}$  con un 20% de diferencia (Tabla 2). Estos resultados indican que Q-1a tiene mayor sensibilidad a cationes que pueden estar relacionados a la incorporación de los ACC disminuyendo efectos de repulsión entre partículas, cambiando el área superficial y favoreciendo la adsorción de cationes.

**Tabla 2. Remoción porcentual máxima de cationes distintos a una concentración inicial de 100 ppm empleando quitosano.**

Catión	% de remoción
Pb	52.78
Cd	70.21
Cr	77.47
Cu	84.74
Ni	74.08
Ca	92.41
Zn	76.80
Al	98.35



**Figura 10.** Contenido de cationes analizado por ICP, después del proceso de floculación en función de la concentración de quitosano sin modificaciones.

#### 4. Conclusiones

Los ACC presentan carga superficial negativa en un amplio intervalo de pH, al incorporarse a quitosano aumentan la solubilidad con el número de equivalentes. El grado de funcionalización también disminuye el potencial de los materiales disminuyendo los efectos de repulsión electrostáticos entre partículas y favorece la interacción con cationes aumentando la sensibilidad y el porcentaje de remoción comparado con el quitosano sin modificaciones. Estas modificaciones los hace candidatos potenciales para su implementación a gran escala en la remoción de cationes mediante la optimización de los procesos de remoción implementados en este trabajo.

#### 5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT-México) por el apoyo a la Beca No. A1-S38139, Beca de Investigación Postdoctoral y Red Temática de Química Supramolecular (Beca 294810).

#### 6. Referencias

1. M. Lanna, C. A. Viancelli, A. W. Michelon, S.V. Castro-Carvalho, D. de Almeida dos Reis, L.A. Fernández de Salles, I.H. Sant'Anna, L.T. Resende, C. de Souza Ferreira, I. Aparecido das Chagas, M. Hernández, H. Treichel, D. Rodríguez-Lázaro, G. Fongaro, *Environ. Pollut.* 2019, 252, 8–13.
2. WHO and UNICEF, Progress on Sanitation and Drinking Water: 2015 Update and MDG 1209 Assessment (accessed July 2022).
3. C.M. Morrison, W.Q. Betancourt, D.R. Quintanar, G.U. Lopez, I.L. Pepper, C.P. Gerba, *Water Res.* 2020, 177, 115812.

4. M.A. Hussein, K.E. Salama, S.A. Saeed, H.A. Hamdy, H. F. E. Yasser, F. L. Amin, El-Sayer. W. Khaled, A.W. Mahmoud, M.Y. Hagag, A.A. Abdel-Aziz, *Sch. Int. J. Chem. Mater. Sci.* 2021, 4, 79-88.
5. G. Tepanosyan, L. Sahakyan, O. Belyaeva, S. Asmaryan, A. Saghatlyan, *Sci. Total Environ.* 2018, 639, 900–909.
6. Pohl A. *Water, Air, & Soil Pollution* 2020, 231, 503-520.
7. D. Kang, X. Yu, M. Ge, F. Xiao, H. Xu, *Res. J. Environ. Sci.* 2017, 54, 1–12.
8. P. Woodberry, G. Stevens, I. Snape, S. Stark, *Solvent Extr. Ion Exch.* 2006, 24, 603–620.
9. Z. Yang, L. J. Li, K. Yang, Z. Zhang, F. Chen, B. Wang. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2020, 12, 15002-15011.
10. V. Saritha, N. Srinivas, N. V. Srikanth Vuppala, *Appl. Water Sci.* 2015, 7, 451-460.
11. M. Wu, W. Chen, Q. Mao, Y. Bai, H. Ma. *Chem. Eng. Res. Des.* 2019, 144, 35–46.
12. V. Dev, V. G. Baburaj, A. S. Arun, K. A. Krishnan, *J. Cleaner Prod.* 2020, 255, 120309.
13. M. Martínez-Quiroz, E. A. López-Maldonado, A. Ochoa-Terán, M. T. Oropeza-Guzman, G. E. Pina-Luis, J. Zeferino-Ramírez. *Chem. Eng. J.* 2017, 307, 981-988.
14. M. Martínez-Quiroz, E. A. López-Maldonado, A. Ochoa-Terán, G. E. Pina-Luis, M. T. Oropeza-Guzman, *Chem. Eng. J.* 2018, 332, 749-756.