

USO DE POLÍMEROS SUPERADSORBENTES EN LA RETENCIÓN DE AGUA Y CONTROL DE METALES PESADOS Y NUTRIENTES EN SISTEMAS DE CULTIVO DE LECHUGA

María del Carmen Damas Job¹; Alma Berenice Jasso Salcedo²; Eduardo Alfonso Treviño; Enrique Jiménez Regalado¹; Fernando Ramírez Luna¹; Alejandro Espinosa¹; Claude St. Thomas^{1*}

¹Departamento de procesos de polimerización. Centro de investigación en Química Aplicada. Enrique Reyna H. 140, San José de los Cerritos, C.P. 25294 Saltillo, Coahuila.

Correo electrónico: claudestthomas@ciqa.edu.mx - 844 211 9986 (*Autor de correspondencia)

Resumen

La escasez y contaminación del agua por metales pesados representa un problema crítico a nivel mundial, particularmente en regiones con recursos hídricos limitados. Esta investigación se enfoca en el desarrollo de polímeros superadsorbentes a base de poli(acrilamida) para mejorar la retención de agua, adsorber metales pesados y liberar nutrientes en sistemas hidropónicos de cultivos de lechuga (*Lactuca sativa* L.). Se sintetizaron hidrogeles mediante polimerización radicalica, con capacidad de adsorber metales pesados como cobre (Cu), zinc (Zn) y cadmio (Cd), obteniendo eficiencias de >94% para Cu, >98% para Cd y >99% para Zn. Además, los hidrogeles mostraron una notable capacidad de hinchamiento, alcanzando hasta 2745 veces su peso en agua destilada. Los materiales CPE3 y CPE4 destacaron por su capacidad para retener agua, remover metales pesados y liberar potasio de manera controlada, mejorando así el crecimiento de las plantas en sistemas hidropónicos. CPE4 mostró un desempeño superior bajo condiciones de altas temperaturas y presencia de múltiples metales, haciendo de estos hidrogeles una herramienta prometedora para la mejora de cultivos en ambientes controlados.

Palabras claves: Caracterización, eficiencia de agua, hidrogeles.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de los recursos hídricos por metales pesados representa un desafío ambiental de gran relevancia a nivel global, debido a la toxicidad, persistencia y capacidad de acumulación de estos elementos en el medio ambiente (Rasha *et al.*, 2023). Metales como plomo, cadmio, mercurio y arsénico, entre otros, pueden ingresar a los ecosistemas a través de actividades industriales, agrícolas, mineras, entre otras, causando efectos adversos tanto en la salud humana como en los organismos vivos. Estos metales se acumulan en los tejidos biológicos y alteran los equilibrios nutricionales en los distintos niveles tróficos (Priya *et al.*, 2023).

En este contexto, los polímeros derivados de la acrilamida (PAM) han demostrado una notable eficacia como superabsorbentes, contribuyendo a la retención de agua en suelos y al tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. La presente investigación tiene como objetivo desarrollar hidrogeles basados en PAM para evaluar su capacidad de reducir las concentraciones de cobre, zinc y cadmio en cultivos de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en sistemas hidropónicos. Además, se busca mejorar la retención de humedad y la liberación controlada de potasio, un macronutriente esencial, dentro de dichos sistemas.

El enfoque del estudio abarca tres aspectos clave: 1) desarrollar polímeros con alta capacidad de retención de agua, 2) evaluar su eficacia en la remoción de metales pesados y 3) analizar su habilidad para liberar de manera controlada el potasio, garantizando un desarrollo óptimo de las plantas en condiciones hidropónicas.

Materiales y Métodos

Síntesis y Caracterización de Copolímeros e Hidrogeles para Aplicaciones en Sistemas Hidropónicos

Se emplearon diversas técnicas analíticas para caracterizar polímeros obtenidos mediante polimerización RAFT y convencional. Resonancia Magnética Nuclear (RMN), Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR) y Análisis Elemental por ICP-OES. Se efectuó la síntesis de copolímeros en bloque de poli(acrilamida) y poli(ácido-2-acrilamido-2-metilpropanosulfónico) (PAM-*b*-PAMPS) utilizando la técnica de polimerización RAFT, para ello, se disolvieron 0.3 g de CTA, 0.03 g de ACPA y 160 g de acrilamida en 400 mL de agua destilada junto con 3 g de 1,3,5-trioxano como referencia interna para el seguimiento mediante RMN¹H, obteniendo un volumen final de 500 mL. La polimerización se realizó bajo agitación a 250 rpm y 70°C por 6 horas, bajo atmósfera de argón. Este método permitió controlar la formación de bloques poliméricos específicos, logrando la construcción de copolímeros con propiedades diseñadas.

De manera similar, se sintetizaron copolímeros aleatorios a partir de acrilamida y AMPS utilizando tanto polimerización RAFT como polimerización convencional, ajustando las condiciones de reacción para obtener los materiales deseados. Se prepararon hidrogeles copolímeros, variando el grado de entrecruzamiento (5, 10, 15, y 25 wt% de MBA). La

síntesis se realizó en 500 mL de agua, bajo las mismas condiciones de agitación y temperatura, con el propósito de evaluar su aplicación en cultivos hidropónicos. Se aplicaron 20 g de hidrogel por tratamiento en bolsas permeables y los metales se añadieron en concentraciones de 0.4 mg/L de Cd, 6.0 mg/L de Cu, y 20 mg/L de Zn. El diseño experimental incluyó el uso de copolímeros CPE3 y CPE\$ (15, y 25 wt% de MBA respectivamente) para adsorber los metales pesados y liberar potasio al medio. Estos polímeros fueron aplicados en un sistema hidropónico de cultivo de lechuga orejona para estudiar su eficacia en la mejora del crecimiento vegetal y su impacto en la disponibilidad de metales y nutrientes en el medio de cultivo. Se monitorearon las necesidades hídricas de las plantas y se verificó la distribución de los polímeros adsorbentes en las raíces. Se recopilaron datos sobre el peso fresco y seco de las raíces y hojas, y se midieron las concentraciones de metales pesados (cadmio, zinc y cobre) en los tejidos vegetales. Además, se analizó la capacidad de los polímeros para adsorber estos metales, cuantificando la cantidad retenida tanto en la solución nutritiva como en los polímeros. Finalmente, se cuantificó la liberación de potasio por parte de los polímeros hacia la solución nutritiva, tanto al inicio como al término del experimento, así como su contenido en raíces y hojas.

Resultados y Discusión

Evaluación de las Propiedades de Adsorción, Retención de Agua y Liberación de Nutrientes en Copolímeros e Hidrogeles

En la investigación se analizaron tres aspectos clave de los hidrogeles: la tasa de evaporación de agua, la retención de agua y la adsorción de metales pesados, en hidrogeles (CPE1-CPE4) figura 1. Los resultados mostraron que: La tasa de evaporación alcanzó hasta el 48% entre las semanas 2 y 8, siendo menor en hidrogeles con mayor entrecruzamiento. En la retención de agua, CPE4 destacó a altas temperaturas (50-60°C), manteniendo hasta un 50% del agua tras 24 horas, mientras que CPE1 y CPE2 tuvieron una menor retención a esas temperaturas. En cuanto a la adsorción de metales pesados, todos los hidrogeles presentaron alta retención de zinc (99%) y cadmio (98.8-99.1%), mientras que la retención de cobre fue ligeramente menor, el tratamiento con CPE4 fue más eficiente, logrando adsorber hasta un 99.8% de Zn, y un 99.1% de Cd, mientras que el cobre (Cu) mostró una menor afinidad con valores de retención entre el 94% y 96%. Esta diferencia en la capacidad de adsorción puede atribuirse a las propiedades químicas de los metales, siendo el zinc y el cadmio más fácilmente capturados por los sitios activos del hidrogel debido a su menor tamaño y mayor movilidad iónica en comparación con el cobre.

Los resultados confirman la hipótesis de que los hidrogeles con mayor grado de entrecruzamiento (CPE4) tendrían una mejor capacidad de adsorción de metales pesados debido a su estructura más densa, lo que coincide con estudios previos que sugieren una mayor retención de metales en redes más entrecruzadas.

En cuanto a la retención de agua, el hidrogel CPE4 demostró ser más eficiente a temperaturas elevadas (hasta 60 °C), reteniendo aproximadamente el 50% de su peso inicial en agua después de 24 horas, mientras que CPE1 y CPE2 retuvieron menos del 50% en las mismas condiciones. Estos datos sugieren que los hidrogeles con mayor grado de entrecruzamiento presentan una mejor estabilidad térmica, manteniendo su capacidad de retener agua incluso a altas temperaturas. Este comportamiento es fundamental para aplicaciones en ambientes de cultivo donde la temperatura es un factor crítico.

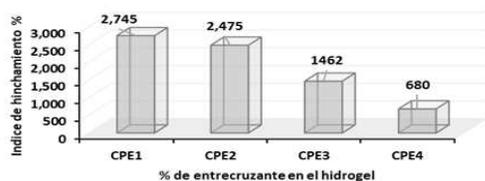
Por otro lado, la liberación de potasio por parte de los hidrogeles fue constante durante el periodo de evaluación de 8 semanas. El análisis mostró que tanto CPE3 como CPE4 liberaron potasio de manera controlada, con concentraciones finales en solución de hasta 300 mg/L. (figura 2b y 2c). Este resultado refuerza la hipótesis de que los hidrogeles pueden actuar como reservorios de nutrientes, liberando potasio de manera sostenida en el sistema hidropónico y favoreciendo el crecimiento de las plantas.

Las mediciones de biomasa fresca y seca (figura 2a y 2b) indicaron que los tratamientos con CPE3 y CPE4, junto con la adsorción de metales pesados y la liberación de potasio, tuvieron un impacto positivo en el crecimiento de la lechuga. En los tratamientos sin presencia de metales, las plantas mostraron un crecimiento cercano al control, lo que sugiere que los polímeros no afectaron negativamente a las plantas en ausencia de contaminantes.

El uso de hidrogeles también demostró su eficacia en la retención de estos metales en sus matrices, lo que disminuyó la absorción de los contaminantes por las plantas.

En conclusión, los hidrogeles utilizados no solo mejoraron la remoción de metales pesados, sino que también mantuvieron un suministro adecuado de nutrientes como el potasio, contribuyendo a un crecimiento más saludable de las plantas en sistemas hidropónicos.

a) Copolímeros entrecruzados



b) Hidrogel en solución nutritiva-K (sin Potasio)

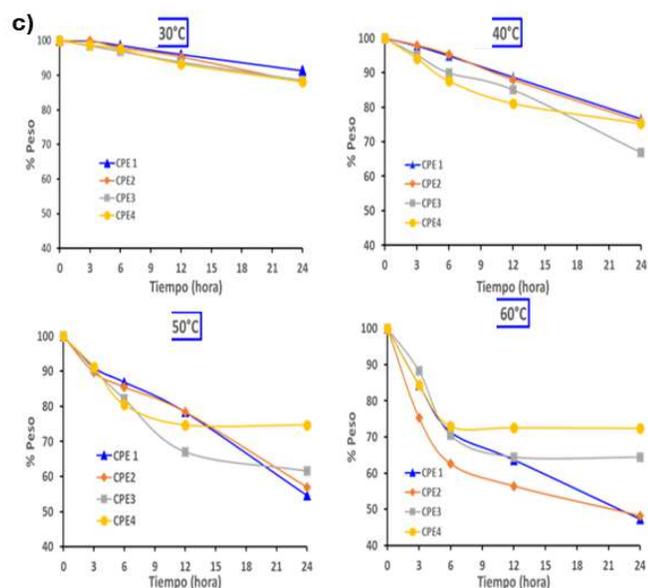
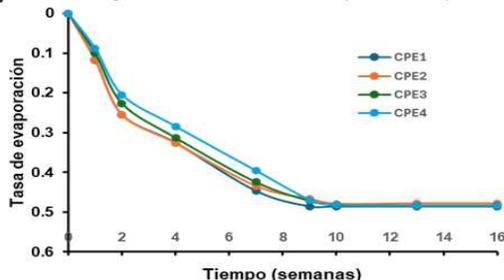


Figura 1. a) Índice de hinchamiento de los diferentes CPE1, CPE2, CPE3 y CPE4, b) Tasa de evaporación de agua en CPE1, CPE2, CPE3 Y CPE4 en solución nutritiva sin potasio. C) Retención de Agua en CPE1, CPE2, CPE3 Y CPE4 a 30, 40 50 y 60 °C en un periodo de 24 h.

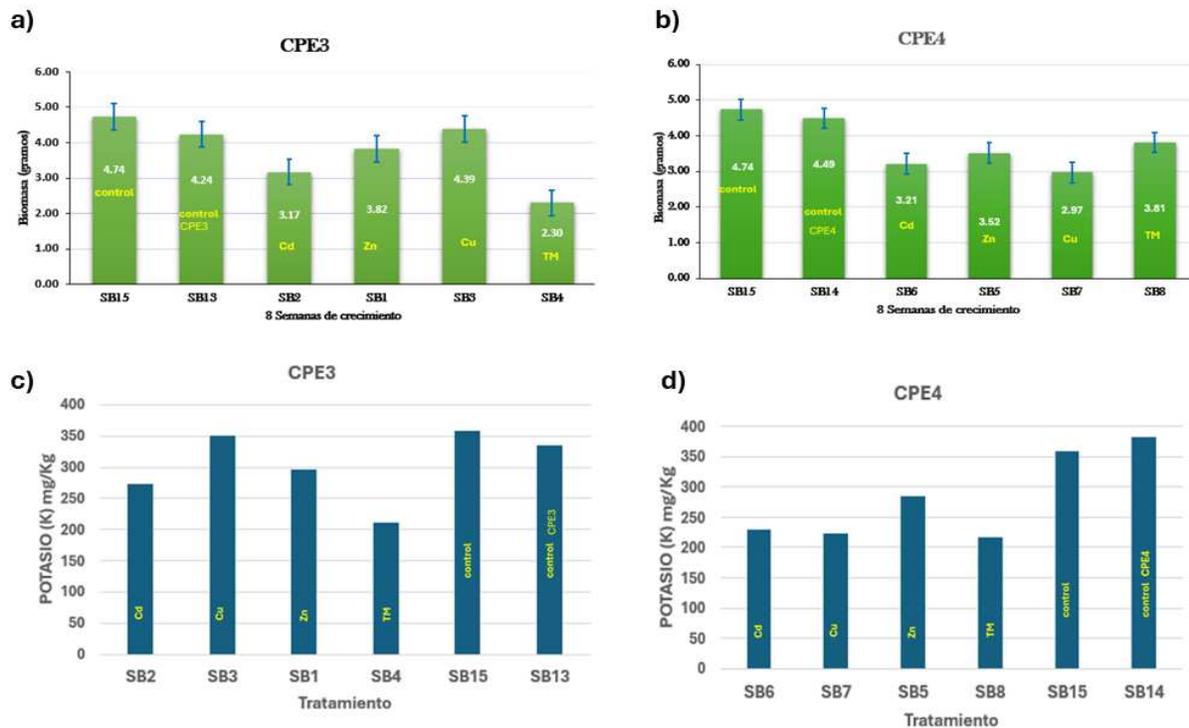


Figura 2. a) y b) Producción de Biomasa de *Lactuca sativa* L. a las 8 semanas de germinación con 4 semanas de tratamiento CPE3 y CPE4. SB15 no contiene hidrogel. c) y d) Concentración de Potasio (K) en mg/Kg en *Lactuca sativa* L. (lechuga) por materia seca con CPE3 y CPE4.

Conclusiones

Los hidrogeles utilizados no solo mejoraron la remoción de metales pesados, sino que también mantuvieron un suministro adecuado de nutrientes como el potasio, contribuyendo a un crecimiento más saludable de las plantas en sistemas hidropónicos.

Referencias Bibliográficas

Cisneros, E., Zayas, R., Cun, G., Herrera, J., y González, F. (2020). Efecto de los polímeros súper absorbentes en la economía del agua para uso agrícola. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 21(1), 1-13.

- Priya, A.K.; Muruganandam, M.; Ali, S.S.; Kornaros, M. (2023) Clean-Up of Heavy Metals from Contaminated Soil by Phytoremediation: A Multidisciplinary and Eco-Friendly Approach. *Toxics*, 11, 422.
- Rasha S. Ahmed, Mohamed E. Abuarab, Mohamed M. Ibrahim, Magdy Baioumy, Ali Mokhtar. (2023). Assessment of environmental and toxicity impacts and potential health hazards of heavy metals pollution of agricultural drainage adjacent to industrial zones in Egypt, *Chemosphere*, Volume 318, 137872, ISSN 0045-6535.