

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE SISTEMAS INTELIGENTES BASADOS EN POLI(ÁCIDO METACRÍLICO-CO-ANILINA) CON PERSPECTIVAS DE APLICACIÓN EN REMEDIACIÓN DEL AGUA

*SYNTHESIS AND PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF
SMART SYSTEMS BASED ON POLY(METHACRYLIC ACID-CO-
ANILINE) WITH PROSPECTS OF APPLICATION IN WATER
REMEDICATION*

SÁNCHEZ OROZCO, Jorge Luis ¹

HERNÁNDEZ RIVERA, Angélica ²

ROMERO ZÚÑIGA, Gabriela Yolotzin ¹

SORIA ARGÜELLO, GUSTAVO ³

PUENTE URBINA, Bertha Alicia ¹

RESUMEN

En este trabajo se reporta la síntesis y caracterización de un copolímero basado en poli(anilina) (poli(ANI)) y poli(ácido metacrílico) (poli(MAA)), con el objetivo de desarrollar un sistema polimérico inteligente con perspectivas de aplicación en la remediación del agua. El sistema poli(MAA-co-ANI) se obtuvo mediante polimerización química *in situ* y se caracterizó mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis), difracción de rayos X (DRX) y análisis termogravimétrico (TGA). Los resultados de FTIR evidenciaron la presencia de grupos funcionales característicos de ambos componentes, así como posibles interacciones intermoleculares entre grupos amino y carboxílicos. Los espectros UV-Vis mostraron variaciones en las bandas de absorción en función del pH, asociadas a cambios en el estado electrónico del sistema. Asimismo, el análisis de DRX indicó modificaciones en el orden estructural respecto de la poli(ANI) prístina, mientras que los resultados de TGA revelaron variaciones en la estabilidad térmica atribuibles a la copolimerización. En conjunto, estos resultados confirman la obtención de un sistema polimérico con propiedades fisicoquímicas modulables y comportamiento pH-responsivo, lo que permite establecer una base para futuras investigaciones orientadas a evaluar su potencial en aplicaciones de remediación del agua.

Palabras clave: poli(anilina); poli(ácido metacrílico); pH-sensibles.

1. Centro de Investigación en Química Aplicada. Saltillo, Coahuila, México.
2. Departamento de Biotecnología, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.
3. SECIHTI-Centro de Investigación en Química Aplicada. Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia

jorge.sanchez.ps@ciqa.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-3644-3220>

Fecha de recepción

14 de febrero de 2026.

Fecha de aceptación

20 de mayo de 2026.

ABSTRACT

This work reports the synthesis and characterization of a copolymer based on poly(aniline) (poly(ANI)) and poly(methacrylic acid) (poly(MAA)), with the aim of developing a smart polymer system with potential applications in water remediation. The poly(MAA-co-ANI) system was obtained by in situ chemical polymerization and characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), and thermogravimetric analysis (TGA). The FTIR results revealed the presence of functional groups characteristic of both components, as well as possible intermolecular interactions between amino and carboxylic groups. The UV -Vis spectra showed pH-dependent variations in the absorption bands, reflecting changes in the electronic state of the system. Furthermore, XRD analysis indicated structural changes compared to the pristine poly(ANI), while TGA results revealed variations in thermal stability attributable to copolymerization. Taken together, these results confirm the development of a polymer system with modulable physicochemical properties and pH-responsive behavior, establishing a foundation for future research to evaluate its potential for water remediation applications.

Keywords: poly(aniline); poly(methacrylic acid); pH-responsive.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la contaminación del agua por sustancias persistentes, como pesticidas, microplásticos, fármacos y colorantes sintéticos, se ha convertido en un problema ambiental y de salud de gran relevancia a nivel mundial. Estos compuestos, derivados principalmente de efluentes industriales, agrícolas, farmacéuticos y domésticos, presentan alta estabilidad química y biológica, lo que impide su degradación natural y dificulta su eliminación mediante métodos convencionales de tratamiento de aguas, como la coagulación, la filtración o la cloración (Fang et al., 2026; Muambo et al., 2024). En este contexto, el desarrollo de materiales funcionales de carácter anfótero representa una estrategia prometedora, ya que permite la interacción con diversas especies iónicas presentes en dichos contaminantes. En particular, los polímeros inteligentes han despertado un creciente interés por

su capacidad de modular sus propiedades en función del entorno y de favorecer interacciones selectivas en medios acuosos.

Entre estos materiales, la poli(ANI) destaca por su facilidad de síntesis, estabilidad química y comportamiento redox reversible, así como por la posibilidad de ajustar sus propiedades ópticas y eléctricas mediante procesos de dopaje y variaciones de pH (Lai et al., 2019; Sharma, Kumar, et al., 2015; Tong et al., 2020; Wang et al., 2022). No obstante, su limitada solubilidad y procesabilidad en medios acuosos restringen su aplicabilidad (Samadi et al., 2023). Por su parte, el poli(MAA) es un polímero pH-sensible con grupos carboxílicos ionizables, lo que le confiere hidrofiliidad y funcionalidad química relevante para aplicaciones ambientales (Sánchez-Orozco et al., 2023, 2024). La conjugación de ambos polímeros permite integrar sus propiedades y obtener materiales cuyo comportamiento puede modularse mediante estímulos externos, particularmente mediante cambios de pH (Samadi et al., 2023).

En este contexto, el presente trabajo aborda la síntesis y la caracterización fisicoquímica de un sistema polimérico inteligente basado en poli(ANI) y poli(MAA) (poli(MAA-co-ANI)), con la finalidad de establecer las bases para futuras investigaciones orientadas a evaluar su desempeño en la interacción con contaminantes emergentes y su posible aplicación en procesos de remediación del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

MATERIALES Y REACTIVOS

Ácido metacrílico (MAA, 99 %), persulfato de amonio (APS, 98 %), N, N'-metilenbisacrilamida (NMBA, 99 %), anilina (ANI, $\geq 99,5$ %) y ácido sulfúrico (H_2SO_4 , 95-97 %). Los reactivos se utilizaron tal como se recibieron de Sigma-Aldrich, a excepción de la anilina, que se destiló antes de su uso. El agua desionizada se obtuvo mediante un sistema de intercambio iónico con cuatro columnas (Cole-Parmer Instruments).



SÍNTESIS DE POLI(MAA-CO-ANI)

En primer lugar, se sintetizó poli(MAA) mediante polimerización por radicales libres. Para ello, 500 mg de MAA se disolvieron en 15 mL de agua desionizada bajo agitación magnética a 300 rpm. Posteriormente, se agregaron 25 mg de iniciador y de agente de reticulación (APS y NMBA, respectivamente). La mezcla resultante se desgasificó con N_2 durante 20 min y la reacción de polimerización se llevó a cabo a 60 °C durante 24 h. A continuación, el poli(MAA) obtenido se precipitó por centrifugación (12 000 rpm) y se lavó varias veces con agua desionizada bajo agitación vigorosa. Finalmente, el poli(MAA) se secó a 60 °C y se almacenó herméticamente hasta su uso.

Por otro lado, para llevar a cabo la síntesis de poli(MAA-co-ANI), se agregaron 80 mg de poli(MAA) a 20 mL de agua desionizada y se dispersaron mediante un baño de ultrasonido durante 20 min. Posteriormente, la dispersión se transfirió a un baño de temperatura controlada a 3 °C y se agregaron 0.3 mL de ANI destilada, seguidos de 2.5 mL de una solución 1 M de H_2SO_4 , y la mezcla se agitó durante 20 min. A continuación, se inició la copolimerización de ANI con poli(MAA) añadiendo 2.5 mL de una solución 1 M de APS y el medio de reacción se mantuvo en agitación constante durante 3 h. El producto obtenido (poli(MAA-co-ANI)) se centrifugó a 12 000 rpm, se lavó varias veces con agua desionizada, se congeló y se liofilizó durante 48 h. Es importante mencionar que, a modo de comparación, también se preparó poli(ANI) siguiendo la misma metodología.

CARACTERIZACIÓN

Los patrones DRX se obtuvieron en el intervalo de 10 a 80° (2 θ), utilizando un difractómetro Rigaku Ultima IV con radiación $CuK\alpha$, operado a 40 kV y 44 mA. Los espectros FTIR se adquirieron en un espectrofotómetro FTIR Nicolet Magna 550, utilizando el método de reflectancia total atenuada (ATR), en la región de frecuencia de 4000 a 400 cm^{-1} . El análisis TGA se realizó bajo una atmósfera controlada de nitrógeno desde temperatura ambiente hasta 700 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C min^{-1} , usando un termoanalizador TGA Q 500 (TA Instruments). Los espectros UV-vis se registraron entre 300 y 1000 nm con un espectrofotómetro CARY60 (Agilent).



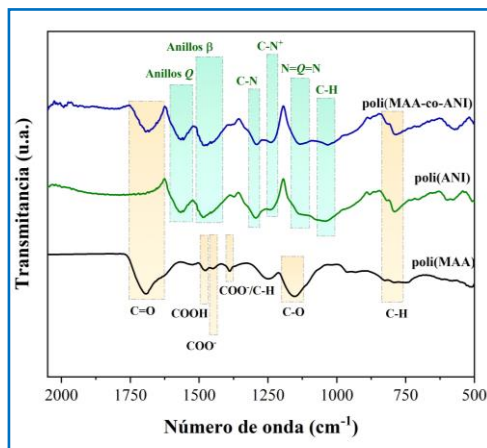
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

INVESTIGACIÓN

ESPECTROSCOPIA FTIR

Los espectros FTIR de poli(MAA), poli(ANI) y poli(MAA-co-ANI) se presentan en la figura 1. El espectro FTIR de poli(MAA) exhibió bandas pronunciadas en 1695 y 1161 cm^{-1} , atribuidas al estiramiento de los enlaces C=O y C-O de los grupos carboxílicos, respectivamente. Adicionalmente, las bandas localizadas en 1425 y 1510 cm^{-1} se asociaron con las vibraciones de deformación del enlace C=O correspondientes a los grupos -COO^- y -COOH . La señal en 1388 cm^{-1} se atribuyó a las vibraciones simétricas del grupo -COO^- y a la deformación del enlace C-H, mientras que la banda en 824 cm^{-1} se asignó a las vibraciones del enlace C-H fuera del plano (Sharma, Kumar, et al., 2015; Tong et al., 2020; Zhang et al., 2023). Por su parte, el espectro FTIR de poli(ANI) exhibió señales intensas en 1565 y 1485 cm^{-1} , características de los movimientos vibracionales de los anillos quinoides (Q) y benzoides (β), respectivamente. Las señales observadas en 1291 y 1235 cm^{-1} correspondieron a la vibración de estiramiento del enlace C-N de los anillos β y al estiramiento C-N en su forma protonada. Asimismo, las bandas ubicadas en 1133 y 1028 cm^{-1} se atribuyeron al estiramiento N=Q=N y a la vibración de flexión del enlace C-H en el plano del anillo aromático, respectivamente (Deshmukh et al., 2019; Rahman Khan et al., 2022; Tong et al., 2020). En el espectro FTIR del copolímero poli(MAA-co-ANI) se identificaron señales características de ambos homopolímeros. Sin embargo, se observaron ligeros desplazamientos en las señales hacia menores números de onda ($\pm 13 \text{ cm}^{-1}$), particularmente en las bandas asociadas a los enlaces C=O y C-N, lo que sugiere la existencia de puentes de hidrógeno entre los grupos amino de poli(ANI) y los grupos carboxílicos de poli(MAA) (Sharma, Kumar, et al., 2015; Tong et al., 2020).

Figura 1. Espectros FTIR de las diferentes muestras sintetizadas.

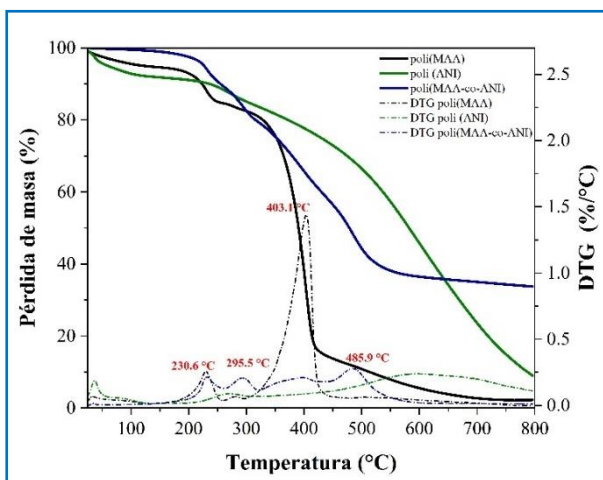


RESULTADOS DE TGA

INVESTIGACIÓN

La estabilidad térmica de poli(MAA-co-ANI) se evaluó mediante análisis TGA y, con fines comparativos, se incluyeron los termogramas de los homopolímeros (figura 2). La curva TGA de poli(ANI) presentó tres etapas bien definidas de pérdida de masa. La primera, en el intervalo de 25 a 150 °C, se atribuyó a la eliminación de moléculas de agua físicamente adsorbidas. La segunda etapa, comprendida entre 250 y 450 °C, se asoció con la ruptura de la cadena principal de poli(ANI) y la eliminación de moléculas dopantes. Finalmente, la tercera etapa (450 a 800 °C) correspondió a la degradación térmica total de poli(ANI) (Lalegül-Ülker y Elçin, 2021; Liu et al., 2020). Por otro lado, la curva TGA de poli(MAA) presentó una pérdida inicial de masa en el intervalo de 25 a 150 °C, atribuida a la eliminación de agua físicamente adsorbida. Posteriormente, se observó una segunda pérdida de masa en el intervalo de 150 a 250 °C, con una temperatura máxima de degradación (DTG) de 230.6 °C, asociada a la deshidratación de los grupos colgantes de las cadenas de poli(MAA). La pérdida de masa registrada en el intervalo de 250 a 350 °C (DTG = 295.5 °C) se relacionó con la descarboxilación de los grupos carboxílicos (-COOH). Finalmente, la etapa comprendida entre 380 y 600 °C, con una DTG de 403.1 °C, se atribuyó a la degradación térmica de las cadenas acrílicas de poli(MAA) (Sánchez-Orozco et al., 2023, 2024). Por su parte, el copolímero poli(MAA-co-ANI) exhibió un comportamiento de pérdida de masa intermedio respecto a los homopolímeros, pero con ligeros desplazamientos en las temperaturas de degradación y un incremento del residuo carbonoso, lo que sugiere la formación de interacciones intermoleculares entre las cadenas de poli(MAA) y poli(ANI) (Rahmouni & Belbachir, 2019; Sharma, Kumar, et al., 2015).

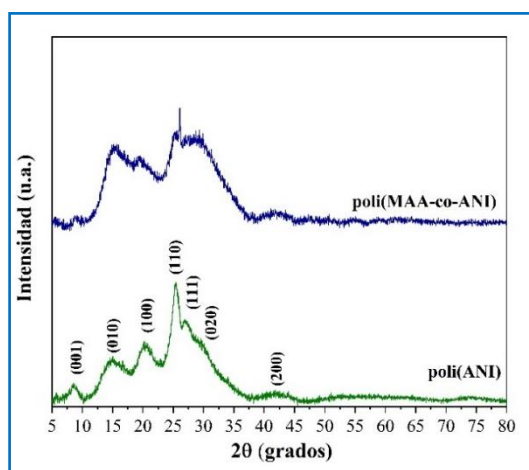
Figura 2. Curvas TGA/DTG de las diferentes muestras sintetizadas.



ANÁLISIS DE DRX

La estructura cristalina del poli(MAA-co-ANI) se investigó mediante DRX y el patrón de difracción resultante se muestra en la figura 3. A modo de comparación, también se incluye el patrón de DRX de poli(ANI). El difractograma de poli(ANI) exhibe picos amplios, pero bien definidos en $2\theta = 8.5, 14.9, 20.1, 25.4, 26.9, 29.9$ y 41.8° , que se atribuyen a reflexiones de los planos cristalográficos (001), (010), (100), (110), (111), (020) y (200), respectivamente, lo que confirma la naturaleza semicristalina del polímero (Lalegül-Ülker y Elçin, 2021). Por el contrario, los patrones de DRX del poli(MAA-co-ANI) muestran una notable reducción de la intensidad y la nitidez de los picos, junto con un ensanchamiento significativo de estos, lo que sugiere una disminución del orden estructural debido a las interacciones intermoleculares entre los grupos $-\text{COO}^-$ del poli(MAA) y los grupos NH_3^+ del poli(ANI), que interrumpen parcialmente el arreglo semicristalino de las cadenas de poli(ANI) (Fazli-Shokouhi et al., 2021; Tong et al., 2020).

Figura 3. Patrones de DRX de poli(ANI) y poli(MAA-co-ANI).



ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA UV-VIS

El espectro UV-vis de poli(MAA-co-ANI) a pH 4 y 7.4 se muestra en la figura 4. A pH 4, el compuesto presentó dos picos de absorción máxima a 330 y 420 nm, atribuidos a las transiciones $\pi-\pi^*$ de los anillos aromáticos β y a la transición polarón- π^* derivada de la protonación de los grupos amina de poli(ANI). Adicionalmente, se observó una banda de absorción ancha en el intervalo de 700 a 950 nm ($\lambda_{\text{max}} = 893$ nm), atribuida a la transición π -polarón debido a la deslocalización de cargas a lo largo de las cadenas del compuesto, lo cual es característico de la presencia de poli(ANI) en su forma sal esmeraldina (Grgur et al., 2023; Salem & Grgur, 2017). El



ensanchamiento y desplazamiento de las bandas a mayores longitudes de onda, respecto a lo informado previamente en la literatura para poli(ANI) prístina (Padmapriya et al., 2018; Rahmouni y Belbachir, 2019; Salem y Grgur, 2017), pueden deberse a la estabilización de especies polaron/bipolaron mediante interacciones intermoleculares entre los grupos del COO^- de poli(MAA) y los grupos NH_3^+ de poli(ANI) que modifican la conjugación electrónica y estabilizan el estado dopado del compuesto (Grgur et al., 2023; Rahmouni & Belbachir, 2019). Por otro lado, el espectro UV-vis de poli(MAA-co-ANI) a pH 7.4 presentó únicamente dos bandas de absorción máxima en 330 y 630 nm, atribuidas a las transiciones $\pi-\pi^*$ de los anillos β y a la excitación molecular de la estructura quinoide-imina, lo que indica la deprotonación parcial de las cadenas de poli(ANI) y su transición hacia la forma base esmeraldina (Ando et al., 2008; Grgur et al., 2023). Además, bajo estas condiciones de pH, las cadenas de poli(MAA) se encuentran ionizadas ($\text{pK}_a = 5.5$), lo que incrementa la carga negativa del compuesto y desestabiliza el estado dopado de las cadenas de poli(ANI) (Sánchez-Orozco et al., 2024).

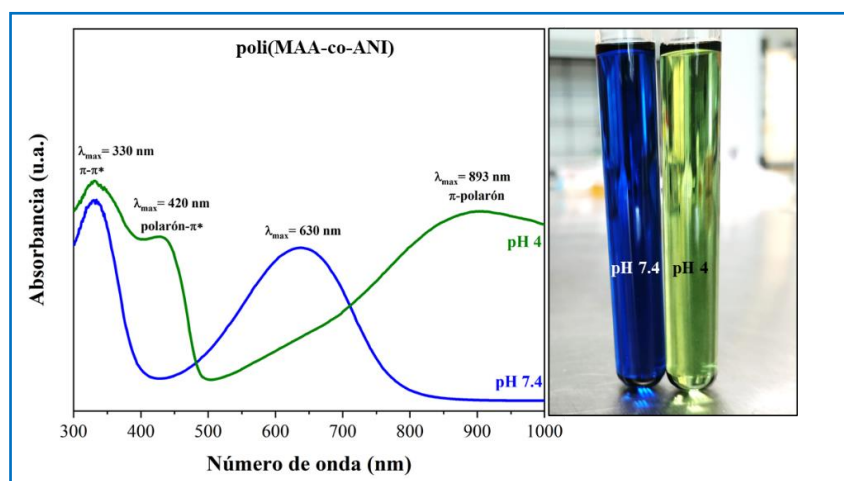


Figura 4. Espectros UV-vis e imagen óptica de soluciones acuosas de poli(MAA-co-ANI) (0.1 mg/mL) ajustadas a dos valores de pH.

Los resultados confirmaron que poli(MAA-co-ANI) presenta un comportamiento pH-sensible, en el que la protonación y deprotonación de los grupos $-\text{COOH}$ de poli(MAA) y de los grupos amina/imina de poli(ANI) inducen cambios en la carga superficial, el estado de dopaje y la conformación estructural del sistema. Estos mecanismos de respuesta permiten modular las interacciones intermoleculares del poli(MAA-co-ANI) en función del entorno, favoreciendo distintos tipos de interacciones, como fuerzas electrostáticas, enlaces de hidrógeno e interacciones $\pi-\pi$ con diferentes compuestos orgánicos (Doh et

al., 2025), lo que hace que poli(MAA-co-ANI) sea atractivo para su aplicación en diversos campos, como la electrónica, el ámbito biomédico y la remediación ambiental. Desde una perspectiva funcional, las variaciones en la carga superficial y en el estado electrónico del copolímero, junto con las modificaciones en el orden estructural, sugieren una reorganización de las cadenas de la red polimérica que puede influir en la accesibilidad y la disponibilidad de los sitios activos. En particular, en aplicaciones de remediación ambiental, estas características podrían favorecer la interacción selectiva con contaminantes emergentes según su naturaleza iónica (Doh et al., 2025; Samadi et al., 2023). Es decir, en medios ácidos, el sistema poli(MAA-co-ANI) podría presentar mayor afinidad por especies aniónicas, como ciertos colorantes o fármacos, mediante interacciones electrostáticas, mientras que en condiciones neutras o básicas podría favorecer la interacción con especies catiónicas. Adicionalmente, la reversibilidad asociada a los procesos de protonación-desprotonación y a las transiciones en el estado electrónico de poli(ANI) sugiere la posibilidad de establecer mecanismos de tipo carga-liberación, lo cual es relevante en términos de la potencial regeneración y reutilización del material mediante ajustes de pH (Samadi et al., 2023). En conjunto, estas características evidencian una relación directa entre las propiedades estructurales y el comportamiento funcional del sistema, lo que respalda su proyección como material inteligente con potencial de aplicación en el tratamiento de aguas contaminadas.

En comparación con estudios previos que reportan sistemas basados en poli(ANI) y polímeros acrílicos, tales como hidrogeles multifuncionales con nanopartículas metálicas (Sharma et al., 2014; Sharma, Kaith, et al., 2015; Virk et al., 2025), redes interpenetrantes Sharma et al., 2015; Sanattalab et al., 2025; Singhal & Datta, 2007), nanocompuestos híbridos (Sanattalab et al., 2025; Singhal y Datta, 2007), el sistema poli(MAA-co-ANI) propuesto en este trabajo corresponde a un copolímero sintetizado sin el uso de reticulantes ni agentes modificadores externos. Por lo tanto, esta estrategia permite evaluar directamente la interacción entre poli(MAA) y poli(ANI), proporcionando una comprensión más clara de la relación entre su estructura, su estado electrónico y su comportamiento pH-responsivo, lo cual es clave para futuras investigaciones sobre su aplicabilidad.

CONCLUSIONES

Se sintetizó un sistema polimérico mediante la conjugación de cadenas de poli(MAA) y poli(ANI) por polimerización química *in situ*. El análisis FTIR confirmó la conjugación exitosa de ambos componentes y evidenció la posible formación de interacciones intermoleculares entre las cadenas poliméricas. Los resultados de DRX sugirieron una modificación del grado de orden estructural con respecto a poli(ANI), mientras que el análisis de TGA evidenció variaciones en la estabilidad térmica atribuibles a la incorporación de cadenas de poli(MAA) en la matriz polimérica. Por su parte, los estudios UV-vis demostraron que el sistema poli(MAA-co-ANI) presenta un comportamiento sensible al pH, lo que refleja cambios en su estructura electrónica asociados a procesos de protonación y deprotonación de sus grupos funcionales. En conjunto, estos resultados confirman la obtención de un sistema polimérico inteligente con propiedades fisicoquímicas modulables, lo que sugiere su potencial como plataforma funcional para aplicaciones relacionadas con la remediación del agua. No obstante, es importante señalar que el presente estudio se centró en la síntesis y caracterización del material, por lo que no se evaluó su desempeño en procesos de remediación, ni en condiciones simuladas ni en condiciones reales. En este sentido, se plantea, como trabajo a futuro, la realización de estudios de adsorción-desorción, así como el análisis de la cinética y las isothermas, que permitan evaluar su interacción con contaminantes emergentes, como colorantes o fármacos, y su posible capacidad de reutilización. De este modo, el sistema poli(MAA-co-ANI) sienta las bases para investigaciones posteriores orientadas a su aplicación en la remediación del agua.

AGRADECIMIENTOS

Jorge L. Sánchez-Orozco y Gabriela Y. Romero-Zúñiga agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) de México por la beca posdoctoral otorgada. Gustavo Soria-Argüello agradece al programa "Investigadores por México- SECIHTI". De igual forma, los autores agradecen al Proyecto CBF-2025-I-4203 (SECIHTI) y a Jesús A. Mercado Silva por su apoyo técnico.



REFERENCIAS

- Ando, R. A., do Nascimento, G. M., Landers, R., & Santos, P. S. (2008). Spectroscopic investigation of conjugated polymers derived from nitroanilines. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 69(2), 319–326. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2007.03.046>
- Deshmukh, S. P., Dhodamani, A. G., Patil, S. M., Mullani, S. B., More, K. V., & Delekar, S. D. (2019). Interfacially interactive ternary silver-supported polyaniline/multiwalled carbon nanotube nanocomposites for catalytic and antibacterial activity. *ACS Omega*, 5(1), 219–227. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02526>
- Doh, S., Eom, S., Choi, S. S., Chung, H., Kim, T., Zoh, K. D., Kim, B., & Kim, K. (2025). Polyaniline as an integrated amine-redox platform for reversible electrosorption and energy-efficient PFAS remediation: From molecular mechanisms to system integration. *Environmental Science & Technology*, 60(1), 1474–1487. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c12920>
- Fang, H., Shan, B., Han, C., Zhu, B., Gu, C., Tan, W., Tian, Y., Ma, J., & Liu, T. (2026). Recent progress in core-shell composites for adsorption in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 380, 135480. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.135480>
- Fazli-Shokouhi, S., Nasirpour, F., & Khatamian, M. (2021). Epoxy-matrix polyaniline/p-phenylenediamine-functionalised graphene oxide coatings with dual anti-corrosion and anti-fouling performance. *RSC Advances*, 11(19), 11627–11641. <https://doi.org/10.1039/d0ra10665h>
- Grgur, B. N., Popović, A. S., & Salem, A. (2023). Influence of alkyd composite coatings with polyaniline doped with different organic acids on the corrosion of mild steel. *Metals*, 13(8), 1364. <https://doi.org/10.3390/met13081364>
- Lai, Y., Wang, F., Zhang, Y., Ou, P., Wu, P., Fang, Q., Chen, Z., & Li, S. (2019). UiO-66 derived N-doped carbon nanoparticles coated by PANI for simultaneous adsorption and reduction of hexavalent chromium from waste water. *Chemical Engineering Journal*, 378, 122069. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122069>
- Lalegül-Ülker, Ö., & Elçin, Y. M. (2021). Magnetic and electrically conductive silica-coated iron oxide/polyaniline nanocomposites for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 119, 111600. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111600>
- Liu, Y., Song, L., Du, L., Gao, P., Liang, N., Wu, S., Minami, T., Zang, L., Yu, C., & Xu, X. (2020). Preparation of Polyaniline/Emulsion Microsphere Composite for Efficient Adsorption of Organic Dyes. *Polymers*, 12, 10167. <https://doi.org/10.3390/polym12010167>

- Muambo, K. E., Kim, M. G., Kim, D. H., Park, S., & Oh, J. E. (2024). Pharmaceuticals in raw and treated water from drinking water treatment plants nationwide: Insights into their sources and exposure risk assessment. *Water Research X*, 24, 100256. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2024.100256>
- Padmapriya, S., Harinipriya, S., Jaidev, K., Sudha, V., Kumar, D., & Pal, S. (2018). Storage and evolution of hydrogen in acidic medium by polyaniline. *International Journal of Energy Research*, 42(3), 1196–1209. <https://doi.org/10.1002/er.3920>
- Rahman Khan, M. M., Islam, M., Amin, M. K., Paul, S. K., Rahman, S., Talukder, M. M., & Rahman, M. M. (2022). Simplistic fabrication of aniline and pyrrole-based poly(Ani-co-Py) for efficient photocatalytic performance and supercapacitors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(89), 37860–37869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.296> Química para publicar(1)
- Rahmouni, A., & Belbachir, M. (2019). Molecular structure of PANI and its homologue PANI-PEO2000 catalyzed by Maghnite-H+ (Algerian MMT): synthesis, characterization and physical and chemical properties. *Polymer Bulletin*, 76(9), 4677–4701. <https://doi.org/10.1007/s00289-018-2620-7>
- Salem, A. A., & Grgur, B. N. (2017). Corrosion of mild steel with composite alkyd polyaniline-benzoate coating. *International Journal of Electrochemical Science*, 12(9), 8683–8694. <https://doi.org/10.20964/2017.09.57>
- Samadi, A., Wang, Z., Wang, S., Nataraj, S. K., Kong, L., & Zhao, S. (2023). Polyaniline-based adsorbents for water treatment: Roles of low-cost materials and 2D materials. *Chemical Engineering Journal*, 478, 147506. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147506>
- Sanattalab, E., Yıldırım-Tirgil, N., & Aksun-Tümerkan, E. T. (2025). A novel hybrid nanocomposite of curcumin, silver, and polyaniline in a PMAA-EGDMA network for enhanced electrochemical and antibacterial performance. *ChemistrySelect*, 10(39), e05002. <https://doi.org/10.1002/slct.202505002>
- Sánchez-Orozco, J. L., Meléndez-Ortiz, H. I., Puente-Urbina, B. A., García-Uriostegui, L., Camacho-Villegas, T. A., Lugo-Fabres, P. H., & García-Cerda, L. A. (2024). Thermo and pH-responsive nanocarriers based on mesocellular silica foam and poly(N-vinylcaprolactam-co-methacrylic acid): Synthesis, characterization, and *in vitro* cytotoxicity assay. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 98, 105849. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.105849>
- Sánchez-Orozco, J. L., Meléndez-Ortiz, H. I., Puente-Urbina, B. A., Rodríguez-Fernández, O. S., Martínez-Luévanos, A., & García-Cerda, L. A. (2023). Synthesis and characterization of a pH- and temperature-sensitive Fe₃O₄-SiO₂-poly(NVCL-co-MAA) nanocomposite for controlled delivery of doxorubicin anticancer drug. *Polymers*, 15(4), 968. <https://doi.org/10.3390/polym15040968>

- Sharma, K., Kumar, V., Kaith, B. S., Kumar, V., Som, S., Kalia, S., & Swart, H. C. (2014). A study of the biodegradation behaviour of poly(methacrylic acid/aniline)-grafted gum ghatti by a soil burial method. *RSC Advances*, 4, 25637–25649. <https://doi.org/10.1039/C4RA03765K>
- Sharma, K., Kumar, V., Kaith, B. S., Som, S., Kumar, V., Pandey, A., Kalia, S., & Swart, H. C. (2015). Synthesis of biodegradable gum ghatti based poly(methacrylic acid-aniline) conducting IPN hydrogel for controlled release of amoxicillin trihydrate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(7), 1982–1991. <https://doi.org/10.1021/ie5044743>
- Singhal, R., & Datta, M. (2007). Development of nanocomposites of bentonite with polyaniline and poly(methacrylic acid). *Journal of Applied Polymer Science*, 103(5), 3299–3306. <https://doi.org/10.1002/app.25334>
- Tong, J., Han, C., Hao, X., Qin, X., & Li, B. (2020). Conductive polyacrylic acid-polyaniline as a multifunctional binder for stable organic quinone electrodes of lithium-ion batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(35), 39630–39638. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c10347>
- Virk, K., Kumar, V., Kumar, A., Kumar, S., Gaur, J., & Dalal, J. (2025). Functionalized gum acacia hydrogels with silver nanoparticles for enhanced antimicrobial and environmental applications. *Applied Organometallic Chemistry*, 39(8), e70309. <https://doi.org/10.1002/aoc.70309>
- Wang, Y., Wang, T., Liu, Y., Geng, H.-Z., & Zhang, L. (2022). Environment-friendly AgNWs/Ti₃C₂T_x transparent conductive film based on natural fish gelatin for degradable electronics. *Frontiers in Chemistry*, 10, 973115. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.973115>
- Zhang, Q., Galvan-Miyoshi, J. M., Pezzotti, F., & Ming, W. (2023). Novel eco-friendly initiation system based on vitamin C for energy efficient synthesis of PMAA hydrogel used for delivery of phenolic compounds. *Chemical Engineering Journal*, 459(8): 141580. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.05.018>