

*Revista SNIQBA***DISEÑO Y OBTENCIÓN DE HIDROGELES A BASE DE POLIACRILAMIDA: ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE HINCHAMIENTO****DESIGN AND OBTAINING OF POLYACRYLAMIDE-BASED HYDROGELS: STUDY OF THE KINETICS OF SWELLING**

José Juan Cedillo-Portillo¹, Jesús Guillermo Soriano-Moro^{1*}, María Teresa Zayas-Pérez¹, Valeria Jordana González-Corone², Miriam Vega Hernández²

¹Centro de Química-ICUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad Universitaria, Puebla, Puebla México

²Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad Universitaria, Puebla, Puebla, México
E-mail: jesus.soriano@correo.buap.mx

Received: October 02, 2023; Revised: October 31, 2023; Accepted: November 05, 2023

Resumen

En el presente estudio se evaluó la cinética de hinchamiento de hidrogeles de poliacrilamida sintetizados mediante la polimerización vía radicales libres. El efecto de la relación del hinchamiento y la difusión de agua se estudiaron con agua desionizada. La cinética de hinchamiento de los hidrogeles se explica mediante un mecanismo de penetración del agua dentro de las cadenas poliméricas, la difusión del agua se lleva a cabo mediante un proceso de difusión del tipo menos fickiano para las muestras PAM35-BIS1 y PAM35-BIS3, mientras que la muestra PAM35-BIS5 presentó un mecanismo del tipo anómalo asimétrico. Se observa que la velocidad de hinchamiento se ajusta a un modelo de primer orden, los mejores valores de hinchamiento se observaron para la muestra PAM35-BIS1, la cual contiene la menor concentración del agente entrecruzamiento alcanzando un hinchamiento del 560 %. Por otro lado, el análisis termogravimétrico mostró que la concentración del agente de entrecruzamiento evaluada no es determinante, debido a que se tiene una tendencia muy cercana como función de la temperatura. Por otra parte mediante la espectroscopía infrarroja se determinaron los grupos funcionales característicos para este polímero en la región de 3350 cm^{-1} aparecen los estiramientos del enlace N-H de la amida y en 1645 cm^{-1} el estiramiento del C=O correspondiente al grupo amida, los cuales son grupos funcionales presentes en la poliacrilamida, además de ser grupos altamente polares lo cual ayuda a la formación de puentes de hidrógeno y la adsorción de agua en este tipo de sistemas, lo que los hace candidatos para su posible empleo dentro del área de las ciencias ambiental.

Palabras clave: Hidrogeles, Poliacrilamida, Polímeros

Abstract

In the present study, the swelling kinetics of polyacrylamide hydrogels synthesized by free radical polymerization was evaluated. The effect of the swelling ratio and water diffusion were studied with deionized water. The swelling kinetics of the hydrogels is explained by a mechanism of water penetration within the polymeric chains, the diffusion of water is carried out by a diffusion process of the less Fickian type for the samples PAM35-BIS1 and PAM35-BIS3, while the PAM35-BIS5 sample presented an anomalous type mechanism, it is also observed that the swelling

speed conforms to a first-order model, the best swelling values were observed for the PAM35-BIS1 sample, which contains the lowest concentration of the crosslinking agent reaching a swelling of 560 %, on the other hand, the thermogravimetric analysis showed that the concentration of the crosslinking agent evaluated is not decisive, since there is a very close trend as a function of temperature. On the other hand, by means of infrared spectroscopy, the characteristic functional groups for this polymer were determined. In the region of 3350 cm^{-1} the stretching of the N-H bond of the amide appears and at 1645 cm^{-1} the stretching of the C=O corresponding to the amide group. which are functional groups present in polyacrylamide, in addition to being highly polar groups which help the formation of hydrogen bonds and the adsorption of water in this type of system, which makes them candidates for possible employment within the area of environmental sciences.

Keywords: Hydrogels, Polyacrylamide, Polymers

Introducción

Hace 30 años los hidrogeles aparecieron en la industria de la agricultura y los pañales, posteriormente su empleo se ha ido diversificando en aplicaciones más específicas. En la actualidad diversos investigadores centran su atención en hidrogeles poliméricos con aplicaciones en diversas áreas como: la electrónica, farmacología, ciencias ambientales, biomedicina y la agricultura (Fan *et al.*, 2008) (Bashir *et al.*, 2020). Los hidrogeles poliméricos, son redes macromoleculares hidrofílicas tridimensionales entrecruzadas que tienen una alta capacidad de retención de agua o de fluidos acuosos debido a sus grupos funcionales hidrofílicos como -COOH, -OH, NH_2 , $-\text{CONH}_2$, y $-\text{SO}_3\text{H}$ (Awasthi *et al.*, 2022; Ahmadian *et al.*, 2023). Los hidrogeles poliméricos son materiales blandos, porosos y con un alto contenido de agua a base de biomacromoléculas y/o polímeros sintéticos, los cuales poseen propiedades tanto físicas como químicas únicas tales como; la porosidad, la biocompatibilidad y la capacidad de almacenar más del 20 % de agua, lo que los hace candidatos ideales en diversas aplicaciones como; la dosificación de fármacos, andamios para regeneración celular, remoción de contaminantes ambientales, dosificación de agua ó nutrientes en la agricultura (Hoffman, 2002; Khan *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2023).

Clasificación de los hidrogeles

Los hidrogeles se pueden clasificar de diferentes formas algunas de estas son: con base a su origen, composición, configuración, carga iónica y tamaño (Ahmadian *et al.*, 2023), en cuanto a su origen los hidrogeles pueden originarse de polímeros naturales, polímeros sintéticos o una combinación de ambos, los polímeros naturales presentan por lo regular características mecánicas deficientes, pero son altamente utilizado en aplicaciones biomédicas,

farmacéuticas y ambientales, debido a su naturaleza no toxica y biocompatible (Mushtaq *et al.*, 2022), entre los cuales encontramos diversos polisacáridos y proteínas como el quitosano, el ácido hialurónico, la gelatina, el colágeno y el alginato (Chen, 2020), mientras que entre los polímeros sintéticos se tiene a la poliacrilamida (PAM), el poli(metacrilato de metilo) (PMMA), el poli(etilenglicol) (PEG) y el poli(alcohol vinílico) (PVA) dando como resultado la obtención de hidrogeles con mejores propiedades como por ejemplo; una alta resistencia mecánica, baja inmunogenicidad y estructura adaptable (Dimatteo *et al.*, 2018; Başıyigit *et al.*, 2023).

Otra clasificación para los hidrogeles es mediante el tipo de entrecruzamiento, es decir entrecruzados de forma física, química o una combinación de las dos, el entrecruzamiento físico, es el resultado de interacciones entre dos puntos en una cadena polimérica ya sea igual o diferente y se da sin enlaces químicos, básicamente por interacciones físicas como: interacciones electrostáticas, enlaces por puente de hidrogeno, fuerzas iónicas, fuerzas de Van del Waals entre otras, mientras que los procesos de entrecruzamiento químico se lleva a cabo en la polimerización por la formación de un enlace químico a lo largo de dos cadenas poliméricas, el enlace químico da como resultado una estructura más fuerte en la red polimérica (Awasthi *et al.*, 2022; Ganguly y Margel, 2022).

El comportamiento del hinchamiento que se lleva a cabo en hidrogeles se puede describir mediante el empleo de diversos modelos matemáticos, el hinchamiento en el equilibrio se refiere al estado estacionario, el antes y el después de que el hidrogel se ha sometido a un cambio de volumen como resultado a la exposición a un disolvente; sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones es necesario conocer el comportamiento del hidrogel al estar en contacto con el disolvente, por lo que es

importante describir el comportamiento dinámico del hidrogel (Porter *et al.*, 2007).

El comportamiento dinámico de adsorción de agua es muy importante para brindar una aplicación para este tipo de materiales ya sea dentro del área ambiental, así como del área biomédica, en los últimos años se ha investigado el tipo de mecanismo de penetración de agua en polímeros reticulados, con contribuciones importantes en la comprensión de la difusión fickiana clásica, cuando se difunde el disolvente dentro del hidrogel la respuesta de este no es inmediata, de tal manera que la penetración del disolvente dentro de la red de las cadenas del hidrogel polimérico se encuentra en función de la estructura de este, por lo que, el transporte en estos casos puede resumirse a tres tipos de fuerzas impulsoras: a) un gradiente de concentración penetrante, b) un gradiente de tensión del polímero y c) fuerzas osmóticas (Brazel y Peppas, 1999; Porter *et al.*, 2007; González *et al.*, 2012).

En todas las aplicaciones donde se involucra a los hidrogeles la capacidad de difusión de moléculas de agua, la tasa de hinchamiento, así como la retención de agua son factores importantes que permite caracterizar este tipo de materiales, por lo general el hinchamiento se encuentra determinado por la difusión de las moléculas de agua en las cadenas vítreas de los xerogeles; sin embargo, cambiando la relación del agente de entrecruzamiento en relación con el monómero o la concentración del polímero se puede modificar este comportamiento (Yavari y Azizian, 2022).

En este estudio se sintetizaron hidrogeles a base de poli(acrilamida), así mismo se investigaron las características de hinchamiento, así como el porcentaje de hinchamiento, la difusión del disolvente y se evaluaron los modelos de la cinética de hinchamiento utilizando una ecuación de primer y segundo orden, dicho estudio se extendió a todas las concentraciones de agente de entrecruzamiento empleado en la síntesis de hidrogeles.

Sección Experimental

Reactivos

Para la realización del trabajo experimental se emplearon como reactivos: Acrilamida (AAm), utilizada como monómero, se adquirió de Sigma Aldrich, la cual se utilizó sin purificación previa, como iniciador de la reacción de polimerización se utilizó

persulfato de potasio (KPS), en tanto que como agente de entrecruzamiento se utilizó *N,N*-metilbisacrilamida (NNMBA), para el lavado de los hidrogeles se utilizó metanol grado comercial, todos los experimentos fueron llevados a cabo con agua desionizada, se utilizó una balanza marca: VELAB modelo VE-300 y un horno de vacío marca: ECOSHEL modelo: HV-20, para la síntesis y el secado de los hidrogeles.

Síntesis de Hidrogeles

En este estudio, se sintetizaron hidrogeles de poli(acrilamida) (PAM) entrecruzada mediante polimerización en solución acuosa por radicales libres de AAm, para ello se sintetizó una serie de hidrogeles mediante el siguiente procedimiento: se preparó una disolución de acrilamida al 35 % (p/v) en agua desionizada y se adicionaron diferentes concentraciones de (NNMBA), que corresponden al 1, 3 y 5 %, y el 1 % (p/p) de KPS, posteriormente se llevó a un baño de ultrasonido por 15 min para asegurar que todos los reactivos se hubieran solubilizado, transcurrido el tiempo la solución preparada se vertió en cajas Petri de 24 pocillos que sirvieron como moldes para la obtención de los hidrogeles, posteriormente se llevaron a una estufa de vacío por 50 min a 60 °C.

El hidrogel sintetizado se extrajo de los moldes y se puso en contacto con agua desionizada para el lavado y posteriormente en metanol al 30 % v/v en agua destilada. Finalmente, los hidrogeles se secaron en un horno a una temperatura cercana a 60 °C hasta alcanzar un peso constante.

Estudio de hinchamiento dinámico

El estudio de hinchamiento dinámico se llevó a cabo mediante el método de gravimetría, el cual consiste en ir midiendo la ganancia en peso del agua con respecto al tiempo de la inmersión del material en agua desionizada, para ello, los hidrogeles fueron secados a peso constante hasta obtener los xerogeles. Los xerogeles se sumergieron en vasos de precipitado con exceso de agua a temperatura ambiente.

A un tiempo determinado se sacaron los hidrogeles y se retiró el exceso de agua con papel absorbente y se tomaron los pesos con una balanza analítica y se devolvieron al vaso de precipitado, finalmente se llegó al equilibrio alrededor de 75 h, después de registrar 3 mediciones sucesivas, cada formulación

se realizó por triplicado y los valores reportados fueron los promedios y su variación estándar.

Porcentaje de hinchamiento

Los valores de hinchamiento se calcularon con la ecuación 1:

$$S = \frac{mt - m_0}{m_0} * 100\% \quad (1)$$

Donde el S es el porcentaje de Hinchamiento mt es el peso del hidrogel hinchado en un tiempo dado y m_0 es el peso del hidrogel seco (xerogel) (Yavari y Azizian, 2022).

Difusión de agua

La ley de Fick se utiliza para explicar la cinética de expansión y la difusión de las estructuras poliméricas. La cinética de hinchamiento es dada por (Ritger y Peppas, 1987), con la ecuación 2:

$$F = \frac{St}{Se} = kt^n \quad (2)$$

A partir de las gráficas de hinchamiento en un tiempo, se evaluó el ajuste en la ecuación de la difusión para tiempos cortos.

Donde "St" representa el hinchamiento a un tiempo dado "Se" representa el hinchamiento en el equilibrio y n es la difusión exponencial del disolvente dicho valor que se encuentra en función de la estructura de la red de los hidrogeles. Por lo que, para conocer el tipo de difusión, se debe conocer el parámetro de "n". El exponencial de difusión de "n" se puede estimar a partir de la pendiente del ajuste lineal de los datos del grafico $\ln F_v / (St - Se)$ de la región donde el hinchamiento aun no alcanza el equilibrio, es decir, donde solo el 60 % de la masa del disolvente penetra en la estructura de los hidrogeles (Guilherme *et al.*, 2015).

Modelado matemático de la cinética de adsorción

Para determinar el mecanismo de hinchamiento de los hidrogeles en agua desionizada, se evaluó su ajuste a las ecuaciones integradas de cinética de primer y segundo orden con respecto al hinchamiento, según lo planteado por Schott (Schott, 1992; Xu *et al.*, 2010).

$$\frac{dS}{dt} = k(Se - St) \quad \text{primer orden (3)}$$

$$\frac{t}{w} = A + Bt \quad \text{segundo orden (4)}$$

Análisis térmico

El análisis térmico fue realizado en un TGA Q500 en el intervalo de 30 a 700 °C, con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, las mediciones térmicas fueron realizadas bajo atmosfera de nitrógeno con una velocidad de flujo de 50 mL/min y la masa de la muestra analizada vario entre 9 a 11 mg.

Espectroscopia infrarroja (FT-IR)

Para la caracterización química se realizó el análisis mediante espectroscopia infrarroja (FT-IR), empleando un equipo marca Perkin-Elmer, mediante Attenuated Total Reflected (ATR), las muestras fueron analizadas sin ningún tratamiento previo y corridas en el intervalo de 4500 a 600 cm^{-1} , con una resolución de 2 cm^{-1} y 32 scans.

Resultados

Hinchamiento dinámico

En la Figura 1, se presenta una fotografía donde se observa un hidrogel a base de poli(acrilamida) en estado xerogel y un hidrogel en el hinchamiento en el equilibrio, donde se puede observar el cambio de volumen del hidrogel.

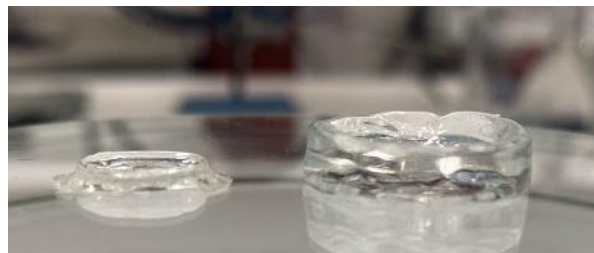


Figura 1. Hinchamiento de hidrogel a base de poli(acrilamida).

Espectroscopia infrarroja

En la Figura 2, se presentan los espectros (FT-IR), correspondientes a los hidrogeles sintetizados con diferentes concentraciones de agente de entrecruzamiento que van del 1, 3 y 5 %, donde se pueden observar bandas características en la región de 3350 a 3180 una banda amplia correspondiente a los estiramientos del enlace N-H de la amida, en 2915 y 2835 cm^{-1} una banda de mediana intensidad, correspondiente a los estiramientos tanto simétricos

como asimétricos del CH₂ y dos bandas en la región de 1645 y 1590 cm⁻¹ del grupo C=O atribuido a la amida primaria y la vibración del alargamiento N-H, así mismo se observa que no hay una diferencia significativa en cada uno de los espectros analizados.

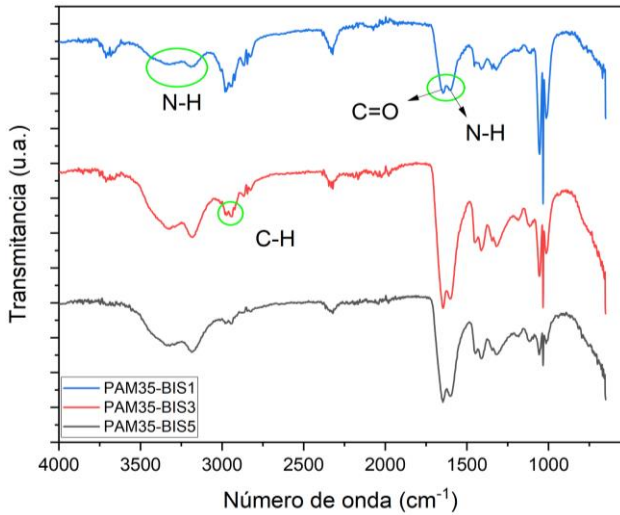


Figura 2. Espectros FT-IR de los hidrogeles sintetizados.

En la Figura 3. Se puede observar la gráfica del porcentaje de hinchamiento, términos generales los hidrogeles presentaron dos fases de hinchamiento, la primera etapa consta de un hinchamiento acelerado la cual está gobernada por una cinética de orden cero mientras que la segunda etapa se lleva a cabo mediante un hinchamiento lento hasta llegar al punto de equilibrio.

Es posible observar que el porcentaje de hinchamiento se encuentra correlacionado directamente con el porcentaje del agente de entrecruzamiento, dicho aumento se debe principalmente a que las cadenas presentan mayor movimiento y es más fácil la difusión del disolvente dentro del polímero. Los valores del porcentaje de hinchamiento se muestran en la Tabla 1. En donde se observa que el hidrogel PAM35-BIS1, fue el hidrogel con el mayor porcentaje de hinchamiento lo cual está directamente relacionado con la concentración del agente de entrecruzamiento, lo cual era un comportamiento esperado debido a que entre mayor sea la concentración del agente de entrecruzamiento se esperan mayores uniones por lo tanto las cadenas poliméricas se encuentran más compactas y será más difícil la penetración del

disolvente, un resultado similar a este lo reportó Lin *et al.*, 2023, estos autores reportaron la obtención de hidrogeles a base de poli(acrilamida) con quitosano; sin embargo, el tiempo de síntesis fue de 4 h para la obtención de los hidrogeles.

Por otra parte Tang *et al.*, 2022, reportó la obtención de hidrogeles entrecruzados a base de poli(acrilamida) con goma xantana mediante el método de un solo paso por medio de polimerización UV, reportando que la adición de la goma xantana ayudo a que el hidrogel no se disgregara después de las 30 h, lo cual es un comportamiento diferente al reportado en este trabajo debido a que, el hidrogel sintetizado no se disgrega aun después de 72 h, lo cual se debe al entrecruzamiento químico.

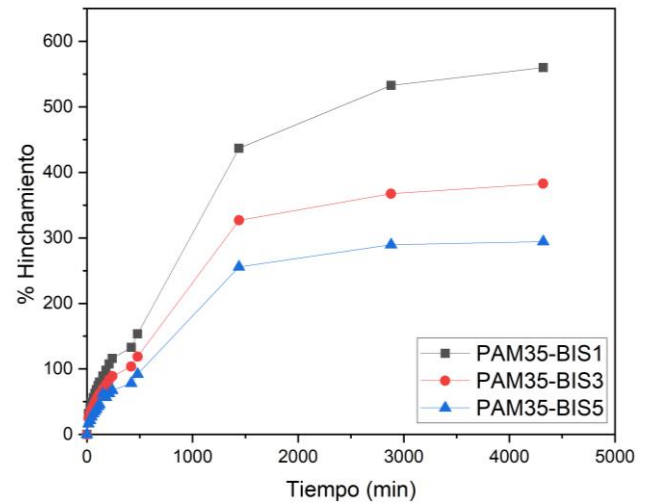


Figura 3. Porcentaje de hinchamiento de hidrogeles en función del tiempo con diferentes concentraciones de agente de entrecruzamiento.

Tabla 1. Porcentaje de hinchamiento para los hidrogeles con diferentes concentraciones del agente de entrecruzamiento.

Muestra	% Hinchamiento
PAM35-BIS1	560.03
PAM35-BIS3	382.81
PAM35-BIS5	294.36

A partir de los datos obtenidos en la determinación del porcentaje de hinchamiento de los hidrogeles se

desarrollan las isotermas de hinchamiento para cada hidrogel sintetizado.

Estudio cinético

El hinchamiento de los hidrogeles se debe, al movimiento a gran escala de las cadenas poliméricas esta separación entre las cadenas va incrementando cada vez más con el hinchamiento, en dichos sistemas a medida que penetra el disolvente en el hidrogel el movimiento de las cadenas poliméricas no es inmediata, por lo tanto, la penetración de las moléculas de agua dentro de las redes poliméricas está en función de la estructura de la red.

Los hidrogeles sintetizados se investigaron desde el punto de vista del proceso de difusión del agua, es decir el mecanismo de transporte de agua dentro del hidrogel y el coeficiente de difusión. En este sentido se analizó el porcentaje del agente de entrecruzamiento (NNMBA) sobre los parámetros cinéticos de los hidrogeles sintetizados.

El comportamiento observado en cada uno de los casos presenta una tendencia similar de dos etapas: la primera corresponde a un hinchamiento acelerado mientras que la segunda etapa se lleva a cabo un hinchamiento lento hasta llegar al equilibrio, dentro de la primera etapa se construyeron gráficos como los que se muestran en la Figura 4, para calcular la difusión del agua dentro de los hidrogeles sintetizados.

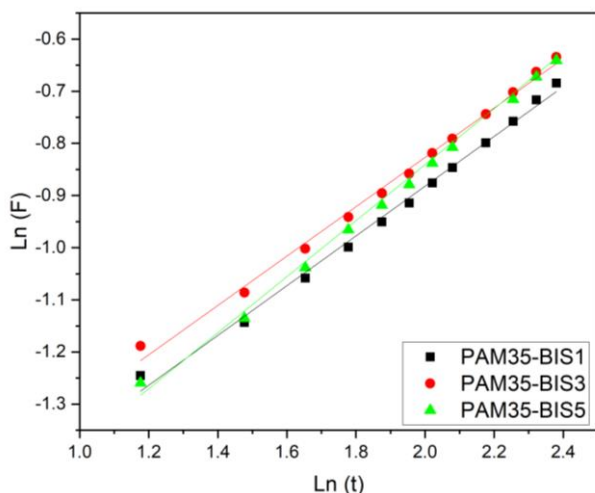


Figura 4. Difusión Fickiana para los hidrogeles de poliacrilamida en diferentes concentraciones del agente de entrecruzamiento.

Como se mencionó anteriormente, la pendiente del gráfico corresponde al coeficiente de difusión (n) el cual indica el tipo de mecanismo para el transporte del agua dentro del hidrogel. Un valor de $n = 0.50$ indica un proceso de difusión Fickiana ideal. Lo cual indica que la difusión del disolvente es mucho más lenta que la relajación de las cadenas poliméricas. Por el contrario, si n es mayor a 0.50, pero menor a 1 el tipo de transporte es anómalo ó no Fickiano, es decir la velocidad de la difusión del disolvente es proporcional a la relajación de las cadenas poliméricas. En la situación en que $n = 1$ el mecanismo de transporte es conocido como caso II, en el cual la velocidad de difusión del disolvente es mayor que la relajación de las cadenas poliméricas (Teodorescu *et al.*, 2010).

Los valores determinados mediante las ecuaciones de la recta para cada uno de los hidrogeles sintetizados se muestran en la Tabla 2. En las muestras PAM35-BIS1 y PAM35-BIS3 se tiene que $n < 0.5$, mientras que para la muestra PAM35-BIS5 el valor de n es mayor a 0.5, pero menor a 1. Cuando se presenta un aumento en la concentración del agente de entrecruzamiento por consecuencia se tiene un aumento en el entrecruzamiento de las cadenas poliméricas, al incrementar el entrecruzamiento de las cadenas poliméricas aumenta el valor de n , lo cual se debe a que al aumentar la concentración del agente de entrecruzamiento se tiene una red tridimensional con mayor número de uniones, por consecuencia el control del proceso de difusión se da mediante un proceso controlado por la relajación de las cadenas poliméricas, lo cual se debe a que es más difícil la difusión de las moléculas de agua dentro de las cadenas poliméricas, un comportamiento similar al obtenido lo reporto Bajpai y Giri, 2003, reportando la obtención de hidrogeles a base de poliacrilamida adicionados con carboximetilcelulosa, mediante la polimerización vía radicales libres, estos autores reportaron que la difusión del agua estaba directamente relacionada con la concentración de agente de entrecruzamiento y la concentración del polímero en el hidrogel.

Tabla 2. Valores para el exponente n para los hidrogeles sintetizados con diferentes concentraciones del agente de entrecruzamiento.

Muestra	n
PAM35-BIS1	0.477
PAM35-BIS3	0.473
PAM35-BIS5	0.523

Posteriormente para conocer la constante de velocidad del hinchamiento (K) de los hidrogeles se empleó el modelo matemático de Schott. En este modelo se evaluaron las ecuaciones de primer y segundo orden, a partir de gráficos de los cuales se pudo determinar la k , así mismo, se reportó el ajuste en las ecuaciones de primer y segundo orden teniendo como resultado que todos los hidrogeles sintetizados presentan un mejor ajuste con la ecuación de primer orden (Schott, 1992).

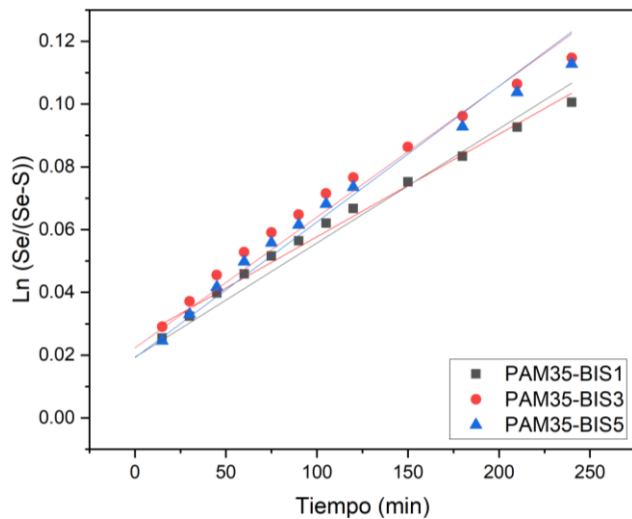


Figura 5. Ajuste lineal del hinchamiento a las cinéticas de primer orden para los hidrogeles con diferentes concentraciones del agente de entrecruzamiento.

Los coeficientes lineales de los ajustes de las cinéticas de primer y segundo orden, referidas en las Figuras 5 y 6 se muestran en la Tabla 3.

Mediante los resultados de las gráficas anteriores se encontró que el incremento de la velocidad de hinchamiento está relacionado con la concentración del agente de entrecruzamiento y es inversamente proporcional al hinchamiento, esto debido a que entre mayor sea la concentración del agente de entrecruzamiento es mayor el número de uniones dentro de la cadena polimérica y disminuye la

cantidad de grupos hidrófilos disponibles, lo cual dificulta la penetración de las moléculas de agua dentro de los hidrogeles, desencadenando en la disminución del hinchamiento y aumentando la velocidad de hinchamiento.

Tabla 3. Coeficientes de ajuste lineal para las cinéticas de primer y segundo orden.

Muestra	R^2 (primer orden)	K_1 (min^{-1}) 10^{-4}	R^2 (segundo orden)	K_2 (min^{-1})
PAM35-BIS1	0.9903	3.640	0.9512	5.198×10^{-6}
PAM35-BIS3	0.9891	4.170	0.9555	8.759×10^{-6}
PAM35-BIS5	0.9883	4.327	0.9536	1.001×10^{-5}

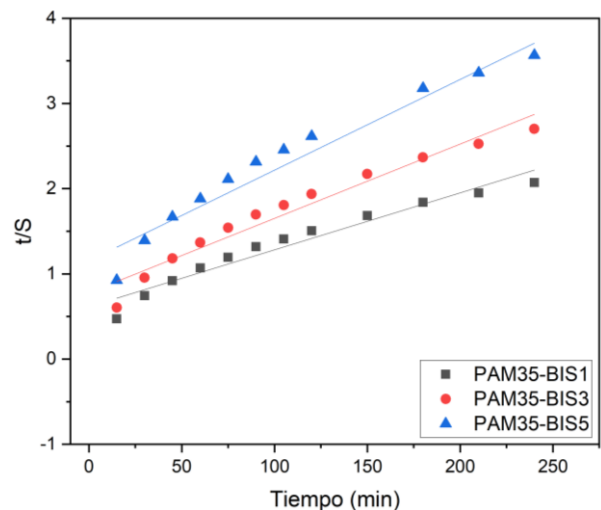


Figura 6. Ajuste lineal del hinchamiento a las cinéticas de segundo orden para los hidrogeles con diferentes concentraciones del agente de entrecruzamiento.

Análisis termogravimétrico

Se estudio la degradación de los hidrogeles en el intervalo de temperatura de 30 a 700 °C, en la Figura 7, se presentan los termogramas analizados así como, sus derivadas para cada uno de los hidrogeles sintetizados, todos los hidrogeles sintetizados presentan un comportamiento similar a la temperatura, teniendo cuatro principales pérdidas en peso, la primera pérdida es la deshidratación del hidrogel, la segunda etapa es la pérdida de los

grupos laterales (Imidización), la tercera etapa se da por la descomposición de la matriz de la poli(acrilamida), y por último la cuarta pérdida corresponde a la pirólisis del material (Zamani-Babgohari *et al.*, 2023).

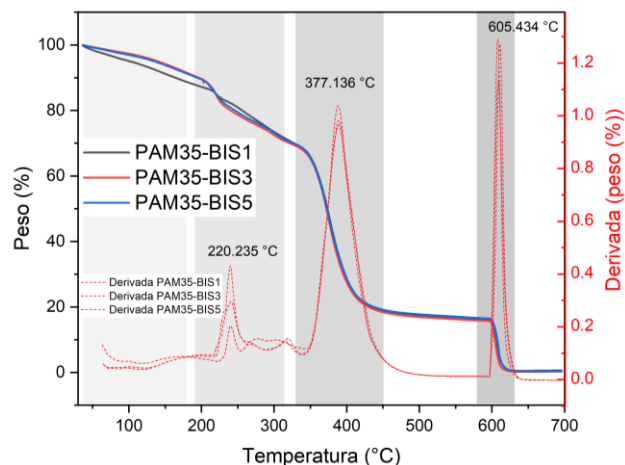


Figura 7. Termogramas de los hidrogeles sintetizados.

Conclusiones

En este trabajo se sintetizaron una serie de hidrogeles a base de poli(acrilamida) con diferente concentración del agente de entrecruzamiento, mediante un método sencillo, el contenido de agua en el equilibrio de los hidrogeles se vio relacionado directamente con la concentración del agente de entrecruzamiento, al disminuir la concentración del agente de entrecruzamiento aumenta el porcentaje de hinchamiento, por otra parte de acuerdo a los valores del coeficiente de difusión (n), los hidrogeles PAM35-BIS1 y PAM35-BIS3 presentaron un proceso de difusión tipo Fickiana ideal o menos Fickiana, mientras que el hidrogel PAM35-BIS5, presentó un mecanismo de penetración del agua del tipo anómalo, todos los hidrogeles presentaron un ajuste en la cinética de hinchamiento de primer orden.

Con respecto a el análisis termogravimétrico, todos los hidrogeles presentaron una tendencia similar en cuanto a la resistencia a la temperatura, la cual no se ve afectada para estos sistemas al variar la concentración del agente de entrecruzamiento y mediante la espectroscopía infrarroja, se observaron las bandas de los grupos funcionales característicos para este polímero, así mismo se propone el uso de este tipo de hidrogeles amigables con el medio

ambiente dentro de las ciencias ambientales debido a la alta adsorción de agua y su buena estabilidad.

Agradecimientos

Se agradece al Laboratorio de Química Ambiental del Centro de Química-ICUAP, así como el apoyo brindado por la Facultad de ingeniería Química y el Centro de Investigación en Química Aplicada, a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por brindar las instalaciones necesarias para la realización la estancia posdoctoral, al CONAHCYT por la beca posdoctoral otorgada CVU 863187 y el proyecto 2023 VIEP-BUAP-100409466.

Referencias

- Ahmadian, M., Derakhshankhah, H., & Jaymand, M. (2023). Recent advances in adsorption of environmental pollutants using metal–organic frameworks-based hydrogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123333. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123333>
- Awasthi, S., Gaur, J. K., Bobji, M. S., & Srivastava, C. (2022). Nanoparticle-reinforced polyacrylamide hydrogel composites for clinical applications: A review. *Journal of Materials Science*, 57(17), 8041–8063. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07146-3>
- Bajpai, A. K., & Giri, A. (2003). Water sorption behaviour of highly swelling (carboxy methylcellulose-g-polyacrylamide) hydrogels and release of potassium nitrate as agrochemical. *Carbohydrate Polymers*, 53(3), 271–279. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(03\)00071-7](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(03)00071-7)
- Bashir, S., Hina, M., Iqbal, J., Rajpar, A. H., Mujtaba, M. A., Alghamdi, N. A., Wageh, S., Ramesh, K., & Ramesh, S. (2020). Fundamental Concepts of Hydrogels: Synthesis, Properties, and Their Applications. *Polymers*, 12(11), 2702. <https://doi.org/10.3390/polym12112702>
- Başıyğit, B., Altun, G., Yüçetepe, M., Karaaslan, A., & Karaaslan, M. (2023). Locust bean gum provides excellent mechanical and release attributes to soy protein-based natural hydrogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 231,

123352.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123352>
- Brazel, C. S., & Peppas, N. A. (1999). Mechanisms of solute and drug transport in relaxing, swellable, hydrophilic glassy polymers. *Polymer*, 40(12), 3383–3398. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(98\)00546-1](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(98)00546-1)
- Chen, Y. (2020). Properties and development of hydrogels. En *Hydrogels Based on Natural Polymers* (pp. 3–16). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816421-1.00001-X>
- Dimatteo, R., Darling, N. J., & Segura, T. (2018). In situ forming injectable hydrogels for drug delivery and wound repair. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 127, 167–184. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2018.03.007>
- Fan, S., Tang, Q., Wu, J., Hu, D., Sun, H., & Lin, J. (2008). Two-step synthesis of polyacrylamide/poly(vinyl alcohol)/polyacrylamide/graphite interpenetrating network hydrogel and its swelling, conducting and mechanical properties. *Journal of Materials Science*, 43(17), 5898–5904. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2855-z>
- Ganguly, S., & Margel, S. (2022). 3D printed magnetic polymer composite hydrogels for hyperthermia and magnetic field driven structural manipulation. *Progress in Polymer Science*, 131, 101574. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2022.101574>
- González, N., Prin, J. L., Benítez, J. L., Ramírez, A., García, A., Ramirez, M., Sabino, M., & Rojas de Gáscue, B. (2012). Estudio de la cinética de difusión en hidrogeles sintetizados a partir de acrilamida-co-ácido acrílico con turba y almidón vía calentamiento convencional y bajo radiación microondas. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 32(1), 136–144.
- Guilherme, M. R., Aouada, F. A., Fajardo, A. R., Martins, A. F., Paulino, A. T., Davi, M. F. T., Rubira, A. F., & Muniz, E. C. (2015). Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review. *European Polymer Journal*, 72, 365–385. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.04.017>
- Hoffman, A. S. (2002). Hydrogels for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 54(1), 3–12. [https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(01\)00239-3](https://doi.org/10.1016/S0169-409X(01)00239-3)
- Khan, S. A., Siddiqui, M. F., & Khan, T. A. (2020). Ultrasonic-assisted synthesis of polyacrylamide/bentonite hydrogel nanocomposite for the sequestration of lead and cadmium from aqueous phase: Equilibrium, kinetics and thermodynamic studies. *Ultrasonics Sonochemistry*, 60, 104761. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104761>
- Lin, X., Liu, Z., Chen, R., Hou, Y., Lu, R., Li, S., Ren, S., & Gao, Z. (2023). A multifunctional polyacrylamide/chitosan hydrogel for dyes adsorption and metal ions detection in water. *International Journal of Biological Macromolecules*, 246, 125613. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125613>
- Mushtaq, F., Raza, Z. A., Batool, S. R., Zahid, M., Onder, O. C., Rafique, A., & Nazeer, M. A. (2022). Preparation, properties, and applications of gelatin-based hydrogels (GHs) in the environmental, technological, and biomedical sectors. *International Journal of Biological Macromolecules*, 218, 601–633. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.168>
- Porter, T., Stewart, R., Reed, J., & Morton, K. (2007). Models of Hydrogel Swelling with Applications to Hydration Sensing. *Sensors*, 7(9), 1980–1991. <https://doi.org/10.3390/s7091980>
- Ritger, P. L., & Peppas, N. A. (1987). A simple equation for description of solute release I. Fickian and non-fickian release from non-swellable devices in the form of slabs, spheres, cylinders or discs. *Journal of Controlled Release*, 5(1), 23–36. [https://doi.org/10.1016/0168-3659\(87\)90034-4](https://doi.org/10.1016/0168-3659(87)90034-4)
- Schott, H. (1992). Kinetics of swelling of polymers and their gels. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 81(5), 467–470. <https://doi.org/10.1002/jps.2600810516>
- Tang, S., Gong, Z., Wang, Z., Gao, X., & Zhang, X. (2022). Multifunctional hydrogels for wound

dressings using xanthan gum and polyacrylamide. *International Journal of Biological Macromolecules*, 217, 944–955. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.181>

Teodorescu, M., Cursaru, B., & Stanescu, P. O. (2010). Swelling and Diffusion Characteristics of Hydrogels Synthesized from Diepoxy-terminated Poly(ethylene glycol)s and Aliphatic Polyamines. *Soft Materials*, 8(3), 288–306. <https://doi.org/10.1080/1539445X.2010.495631>

Wang, S., Yu, P., Li, X., Zhao, Z., Dong, Y., & Li, X. (2023). Design and fabrication of functional hydrogels with specific surface wettability. *Colloid and Interface Science Communications*, 52, 100697. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2023.100697>

Xu, S., Fan, L., Zeng, M., Wang, J., & Liu, Q. (2010). Swelling properties and kinetics of CaCl₂/polyacrylamide hygroscopic hybrid hydrogels. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 371(1–3), 59–63. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.09.003>

Yavari, N., & Azizian, S. (2022). Mixed diffusion and relaxation kinetics model for hydrogels swelling. *Journal of Molecular Liquids*, 363, 119861. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119861>

Zamani-Babgohari, F., Irannejad, A., Khayati, G. R., & Kalantari, M. (2023). Non-isothermal decomposition kinetics of commercial polyacrylamide hydrogel using TGA and DSC techniques. *Thermochimica Acta*, 725, 179532. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2023.179532>