

SÍNTESIS DE HIDROGELES DE ACRILAMIDA - MUCILAGO DE NOPAL MEDIANTE POLIMERIZACIÓN POR RADICALES LIBRES

SYNTHESIS OF ACRYLAMIDE - NOPAL MUCILAGE HYDROGELS FROM THE FREE-RADICAL POLYMERIZATION

Verónica Romero-Montiel^{1*}, Shirley Carro-Sánchez², Alejandro Rodríguez-Juárez¹, María Ariadna Ramírez-Martínez¹

¹Tecnológico Nacional de México, campus Tlaxco, Tlaxco Tlaxcala, México, ²Universidad Autónoma de Tlaxcala, Apizaco, Tlaxcala, México.

*veronica.rm@tlaxco.tecnm.mx

Recibido: 30-Noviembre-2025

Aceptado: 28-Diciembre-2025

RESUMEN

Este trabajo propone la viabilidad de producir hidrogeles a partir de la polimerización de radicales libres en solución acuosa de acrilamida con mucílago de nopal. Se vario la concentración de Acrilamida de 60-100 (Ac60/Mu40, Ac70/Mu30, Ac80/Mu20 y Ac100). Al caracterizar los hidrogeles se encontró que, la relación acrilamida/mucilago tiene efecto directo en la cinética de hinchado ya que, a mayor cantidad de acrilamida, aumentó la cantidad de agente entrecruzante y por lo tanto menor solubilidad del gel formado. Además, se analizó la cinética de hinchado, encontrando que los hidrogeles que contienen mucilago se ajustan a un modelo de pseudo-segundo-orden y el de Ac100 se ajustó al pseudo-primer-orden.

Palabras Clave: Catalizador, Cinética, Hidrogel, Mucilago, Polimerización.

ABSTRACT

This work proposes the viability of producing hydrogels from the free-radical polymerization in an aqueous solution of acrylamide with nopal mucilage. The acrylamide concentration was varied from 60 to 100 (Ac60/Mu40, Ac70/Mu30, Ac80/Mu20 and Ac100). Characterization of the hydrogels revealed that the acrylamide/mucilage ratio has a direct effect on swelling kinetics. Higher acrylamide concentrations increased the amount of crosslinking agent and, consequently, reduced the solubility of the resulting gel. Furthermore, the swelling kinetics were analyzed, finding that the hydrogels containing mucilage conformed to a pseudo-second-order model, while those containing Ac100 conformed to a pseudo-first-order model.

Keywords: Catalyst, Hydrogel, Kinetics, Mucilage, Polymerization

1. INTRODUCCIÓN

Los hidrogeles o polímeros super absorbentes (SAPs), son redes poliméricas entrecruzadas, insolubles en agua, que pueden absorber y retener una gran cantidad de disolución acuosa o de

fluidos biológicos [Ortiz-García y Col., 2021], debido a su carácter hidrófilo causado por la presencia de grupos compatibles con el agua, tales como hidroxilo (-OH), carboxilo (-COOH), amida (-CONH₂) y sulfónico (-SO₃H) (García Sánchez y Cortés Ortega, 2014). La relevancia de los hidrogeles radica en su versatilidad sintética y en la posibilidad de modulares propiedades como la porosidad, la capacidad de hinchamiento, la biodegradabilidad y la biocompatibilidad mediante la selección de copolímeros, agentes entrecruzante y condiciones de reacción [Hoare y Kohane, 2008]

Los hidrogeles de poliacrilamida han recibido especial atención en los últimos años, debido a sus atractivas propiedades, por ejemplo, capacidad de hinchamiento, biocompatibilidad y biodegradabilidad, esto ha permitido su uso en tratamiento de agua, agricultura, liberación de fármacos, industria alimenticia, bioingeniería, medicina, entre otros [Felix Rodríguez , 2006]. El entrecruzamiento es esencial para formar la red tridimensional, se logra mediante agentes como N,N'-metilen-bis-acrilamida, que conecta las cadenas del monómero. Recientemente, la introducción de nanocrstales de celulosa, nanopartículas inorgánicas u otros refuerzos ha permitido desarrollar hidrogeles nanocomuestos con propiedades mecánicas mejoradas, como la alta tenacidad y capacidad de autor reparación [Schexnailder, P. y Schmidt, G., 2009]

Es por ello que el presente trabajo pretende la elaboración de hidrogeles a base de acrilamida y Mucilago proveniente del nopal (*Opuntia ficus-indica*), con el objetivo de encontrar la concentración optima de acrilamida y mucilago para lograr la mayor capacidad de hinchamiento y absorción de agua. Para el uso futuro en el tratamiento de aguas residuales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Acrilamida (Ac), N, N'- metilen-bis-acrilamida (NMBA), persulfato de potasio (KPS) Tetrametiletendiamina (TEMED) de Sigma-Aldrich®, agua destilada, alcohol etílico al 96%, acetona, de marca Meyer. Balanza analítica marca Velab, estufa de secado H-33D marca Rirossa, parrilla de calentamiento Cimarec, columna de destilación EDF-10000 marca Prendo, Digestor modelo HB-1 de la marca WEALTEC Co.

2.1 Extracción de mucilago de nopal

Los cladodios (pencas) se limpian, lavaron, cortaron y maceraron (en agua destilada) por 24 horas a temperatura ambiente, la mezcla formada se molio y puso en contacto con etanol en una relación 1:3, con respecto al volumen de la mezcla licuada, al estar en contacto los dos materiales, se formó una fibra blanquecina, la cual se recuperó por filtración y que, posteriormente se secó (a 40°C), trituró y tamizó (200μm). El polvo (mucilago) obtenido se almacenó a temperatura ambiente para su posterior uso.

2.2 Síntesis de hidrogeles de Acrilamida- mucilago de nopal

El entrecruzamiento de los copolímeros se realizó mediante una polimerización de radicales libres en solución acuosa, de los monómeros de acrilamida (Ac) y mucilago de nopal (Mu), adiconando persulfato de potasio (KPS) como iniciador, agente entrecruzante N, N'- metilen-bis-acrilamida (NMBA) y tetrametiletendiamina (TEMED) como acelerador de la reacción.

En la síntesis de los hidrogenes, se varió la relación en peso de Acrilamida a Mucilago (desde 60 a 100%) y analizo como ésta influye en las propiedades del hidrogel, tales como capacidad de hinchado, adsorción y solubilidad. Los hidrogeles se denominaron Ac60/Mu40, Ac70/Mu30, Ac80/Mu20 y Ac100, donde los números corresponden al porcentaje de los monómeros (en

gramos), en todas las síntesis, se consideró el 1% de NMBA, 2% de KPS y 2% de TEMED, respecto a la masa de la Ac usada.

2.3 Caracterización de los hidrogeles

Mediante el porcentaje de hinchamiento se conoce el aumento en tamaño que tiene el hidrogel al momento que empieza a absorber agua. Se pesó una cantidad de xerogel, denotada como w_s , se sumergió en agua destilada a cierto tiempo, se pesó, registrando su valor como w_H . El porcentaje de hinchado (%H), así como el porcentaje de agua absorbida por gramo de hidrogel seco (%A) se calcularon mediante las siguientes ecuaciones [Ortiz-García y Col.2021; Chimal-Cabrera, 2018]:

$$\% H = \frac{w_H - w_s}{w_s} \times 100 \quad (1)$$

$$\% A = \frac{w_H - w_s}{w_s} \times 100 \quad (2)$$

donde w_H es el peso del hidrogel hinchado a un tiempo determinado, w_s peso del hidrogel seco (peso inicial).

Mediante los datos anteriores, se determinó la cinética de hinchamiento con el fin de calcular la constante de velocidad y analizar el proceso de adsorción de agua. Se uso el modelo de pseudo-primer-orden (Ecuación 3) y pseudo-segundo-orden (Ecuación 4)

$$\ln(q_{eq} - q) = \ln q_{eq} - k_1 t \quad (3)$$

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 q_{eq}^2} + \frac{1}{q_{eq}} t \quad (4)$$

donde q representa la relación de hinchamiento en peso, está dado mediante $\frac{w_H}{w_s}$, t es el tiempo en horas, k_1, k_2 son las constantes de velocidad de hinchamiento y q_{eq} denota la relación de hinchamiento en equilibrio [Corona-Rivera y col., 2017]. Se graficaron las ecuaciones 3 y 4 por separado, se ajustaron los datos a una regresión lineal, para obtener los parámetros desconocidos.

Además, se determinó el porcentaje de solubilidad con el fin de saber la cantidad de hidrogel que fue insoluble en solución acuosa, el procedimiento consistió en pesar el xerogel w_s , colocarlo en exceso de agua destilada, agitarlo por 24 horas, secarlo a 40°C y registrar peso final w_f . El cálculo se realizó mediante la ecuación 5

$$\% Sol = \frac{w_s - w_f}{w_s} \times 100 \quad (5)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Síntesis de hidrogeles de Ac-Mucilago

Se logró la gelificación de los hidrogeles de acrilamida con mucilago de nopal y los de acrilamida, mediante el procedimiento y condiciones descritas. Se realizaron varias pruebas a diferente temperatura, determinándose que a 36°C se logró efectuar la polimerización y el entrecruzamiento de las cadenas, posiblemente debido a la adición del TEMED que actuó como acelerador de la reacción. La formación del gel fue apreciable a los 30 minutos para el caso de Ac100 y el tiempo fue

aumentando conforme la cantidad de mucilago aumentó, observando que a las 4 horas ya se contaba con gel (en todas las pruebas), sin embargo, se dejaron por dos horas más para asegurar una completa polimerización. En la Figura 1, se muestran los xerogeles, observándose que presentan menos rigidez Ac60/Mu40 y Ac70/Mu30, por tanto, más elasticidad en estado hidratado (Figura 2), en cambio, Ac80/Mu20 y Ac100 fueron más frágiles en forma de xerogel, esto se debió a que la cantidad del agente entrecruzante (N MBA) está en función de la Ac usada y que dio mayor rigidez al polímero pues se incrementaron los puentes entre las cadenas, tal como lo establece Corona-Rivera y col. [2017].

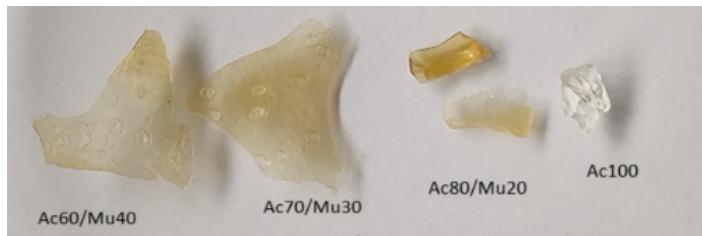


Figura 1. Xerogeles de Acrilamida con Mucilago de nopal

3.2 Caracterización de los hidrogeles

Se estudiaron los geles sintetizados (Ac60/Mu40, Ac70/Mu30, Ac80/Mu20 y Ac100), mediante su caracterización, para tal caso, se determinó el porcentaje de hinchado, adsorción de agua, solubilidad y cinética de hinchado, analizando como influyen las cantidades de monómeros considerados en los resultados obtenidos.

En primer lugar, se estudió el hinchado de los hidrogeles. Se pesaron los geles en estado seco (xerogel), Figura 1, y en cierto tiempo en estado hidratado (Figura 2), hasta alcanzar el equilibrio. con los pesajes y el uso de la Ecuación 1, se calculó el porcentaje de hinchado (Figura 3).



Figura 2. Hidrogeles de Acrilamida con Mucilago de nopal, en equilibrio.

En la Figura 3 se observa que el hidrogel Ac60/Mu40 alcanzo mayor porcentaje de hinchado con valor de 93.13% debido a que presenta menor cantidad de agente entrecruzante, en comparación con Ac70/Mu30 que alcanzo el 91.03%, Ac80/Mu20 de 90.67% y el de Ac que solo presento el 73.44 por ciento, comprobándose lo establecido por Ortiz-García y col. [2021] quienes establecieron que el grado de entrecruzamiento tiene un efecto directo sobre la capacidad de hinchado del polímero y la fortaleza de la cadena, es decir, el incremento de la densidad de entrecruzamiento da lugar a que decrezca la capacidad de hinchar y aumente la fortaleza del gel.

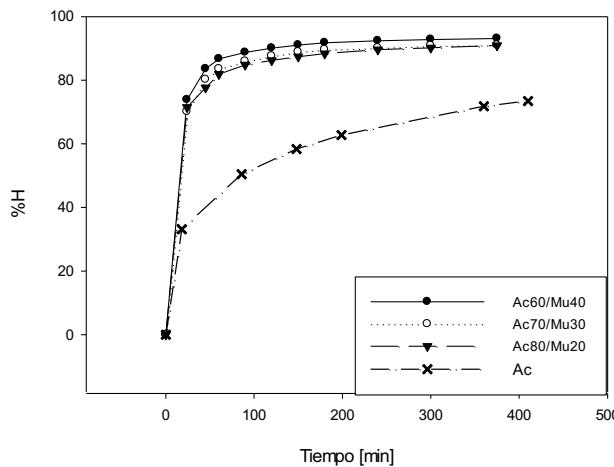


Figura 3. Porcentaje de hinchado

El estudio del porcentaje de agua absorbida (%A) proporciona la cantidad de líquido que puede almacenar el hidrogel en su red polimérica en función del tiempo, además, es una manera cualitativa de inferir en la densidad de entrecruzamiento de la red [Chimal Cabrera, 2018], mismo que se puede apreciar en la Figura 4, se nota que el hidrogel de Ac60/Mu40 alcanzo máximo valor de agua adsorbida, con una cantidad de 1354%, Ac70/Mu30 almacenó 1245%, en Ac80/Mu20 el porcentaje fue de 1008% y los hidrogeles de Ac sólo 660%, esta cantidad fue medida a las 30 horas de estar en contacto el hidrogel con agua destilada, mediante estos valores podemos concluir que el hidrogel Ac60/Mu40 presenta menor grado de entrecruzamiento y mayor espacio para incorporar moléculas de agua en comparación con el de acrilamida siendo este último un polímero más rígido debido a un incremento de puentes en la cadena, lo que comprueba la descripción presentada en el porcentaje de hinchamiento, del apartado anterior.

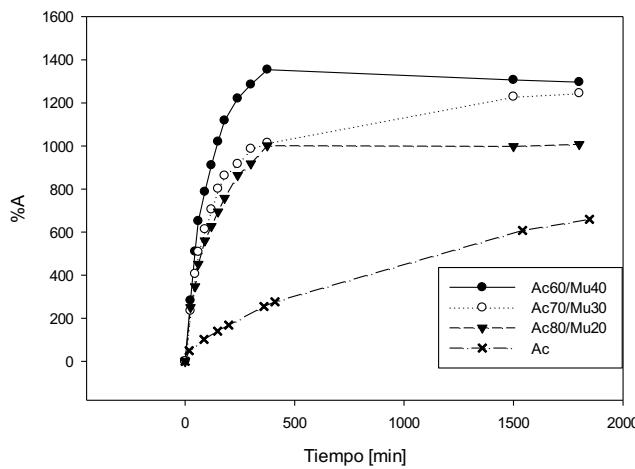


Figura 4. Porcentaje de absorción

Se analizo la cinética de hinchado mediante las ecuaciones 3 y 4, cabe resaltar, que los hidrogeles Ac60/Mu40, Ac70/Mu30 y Ac80/Mu20, siguieron la cinética de segundo orden, el cual es comúnmente usado en cinética de hinchado [Cortés Ortega , 2013] y los hidrogeles de Ac se justaron

al modelo de primer orden, tal ajuste se muestra en la Figura 5 y Figura 6 junto con la regresión lineal y los parámetros del modelo matemático se presentan en la Tabla 1.

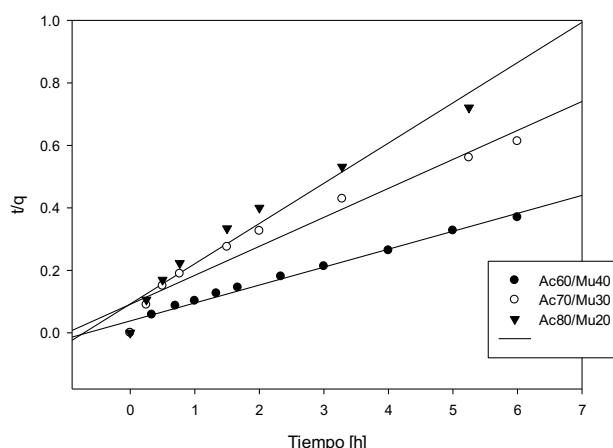


Figura 5. Ajuste de cinética de hinchado para modelo de pseudo-segundo-orden

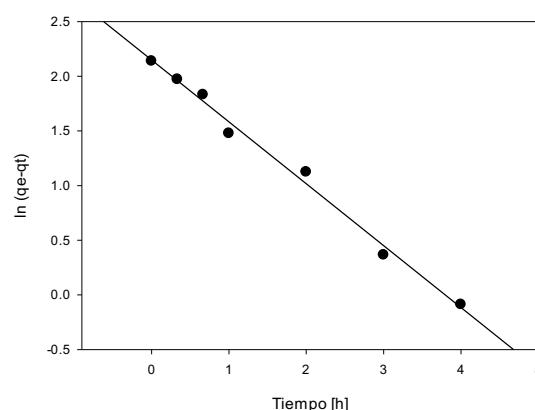


Figura 6. Ajuste de cinética de hinchado para modelo de pseudo-primer-orden de hidrogeles de acrilamida

El estudio de los parámetros de cinética de hinchado, muestran un incremento en la capacidad de absorber conforme se aumentó la cantidad de mucilago en el hidrogel, originado por menor reticulación. De igual manera, la constante de equilibrio se puede relacionar con las cargas del grupo funcional del hidrogel, tal como lo establece Corona-Rivera [2017], al aumentar el porcentaje de NMBA, aumentan los grupos NH en la cadena, resultando en mayor valor de la constante de equilibrio.

Tabla 1. Parámetros de la cinética de hinchado

	Velocidad de hinchado inicial, r_0	k_2 , modelo pseudo-segundo-orden	Máxima relación de hinchado en peso	Coeficiente de regresión r2	k_1 , modelo pseudo-primer-orden
Ac60/Mu40	30.9597	0.1365	15.0602	0.9838	
Ac70/Mu30	10.9649	0.0944	10.7758	0.9522	
Ac80/Mu20	9.9800	0.1470	8.2372	0.9657	
Ac100	0.4653	-----	8.5788	0.992	0.5661

La solubilidad permite conocer que tanto se disuelve el hidrogel en agua, en el caso de Ac60/Mu40, se obtuvo la mayor solubilidad (28%), este dato indica que el porcentaje de gel formado corresponde al 72%. Analizando los valores de porcentaje de gel, estos fueron aumentando conforme se aumentó la cantidad de Ac, los porcentajes obtenidos fueron 75, 84 y 95% para Ac70/Mu30, Ac80/Mu20 y Ac100, respectivamente.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se encontró que es posible la síntesis de hidrogeles de Ac con Mucilago de nopal, obteniendo geles homogéneos, con buena capacidad de hinchado y de absorción de agua. Los resultados arrojaron que el hidrogel Ac60/Mu40 alcanzó mayor porcentaje de hinchado (93.13%) y mayor valor de agua adsorbida, 1354%, en contraparte con la Ac que sólo absorbió 660%. En los

estudios de la cantidad de solubilidad, se encontró que los hidrogeles de acrilamida presentaron menor valor. Con esta caracterización se concluyendo que la relación de Ac/Mu, tiene un efecto directo en la capacidad que tiene el hidrogel de hincharse, de absorber agua y de cantidad de gel formado, ya que al aumentar la cantidad de Acrilamida aumentó el grado de entrecruzamiento de la red polimérica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México y al Gobierno del Estado de Tlaxcala por el financiamiento a este trabajo, bajo la clave 22358.25-PD.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Chimal Cabrera, K. (2018). *Síntesis de hidrogeles mediante emulsión doble*. Apizaco, Tlaxcala México : Universidad Autónoma de Tlaxcala, Facultad de Ciencias Básicas Ingeniería y tecnología .
- Corona-Rivera, M., Ovando-Medina, V., Bernal-Jacome, L., Cervantes-González, E., Antonio-Carmona, I., Dávila-Guzmán, N. (2017). Remazol red dye removal using poly(acrylamide-co-acrylic acid) hydrogels and water absorbency studies. Springer Colloid Polym Sci. , 295(1), 227-236. <https://doi.org/10.1007/s00396-016-3996-2>
- Cortés Ortega , J. (2013). Hidrogeles microestructurados de Acrilamida y determinación de su capacidad de absorber agua y etanol. Química Nova, 36(6), 757-761.
- Felix Rodríguez , D. (2006). Síntesis Y Caracterización De Hidrogeles De Redes Semi-interpenetradas Basadas En Poli(acrilamida) Y Poli(ácido-γ-glutámico). México: Centro de Investigación en Química Aplicada.
- García Sánchez, L., Cortés Ortega, J. (2014). Síntesis de Hidrogeles de Acrilamida en Soluciones Acuosas de Etanol. Polímeros: Ciência e Tecnologia [en linea], 24(6), 752-756. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1663>
- Hoare , T., Kohane, D. (2008). Hidrogeles en la administración de fármacos: avances y desafíos. ScienceDirect, ELSEVIER, 1993-2007. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.01.027>
- Ortiz-García, T., Rapado-Paneque, M., Peniche-Covas, C. (2021). Hidrogeles superabsorbentes basados en poliacrilamida para aplicación agrícola: estudio de hinchamiento. Rev. Cubana Quím., 33(2), 46-68.
- Schexnailder, P., Schmidt, G. (2009). Nanocomposite polymer hydrogels. Colloid and Polymer Science, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00396-008-1>