







Efecto del ZnO en las propiedades de películas de almidón Effect of ZnO on the properties of starch films

B. A. Moreno-Arellanes ^a, Y. D. Cerda-Sumbarda ^a, M. A. González-Urías ^a, R. M. Félix-Navarro ^a
A. Zizumbo-López ^a, B. Trujillo-Navarrete ^{a*}

^a Tecnológico Nacional de México/ IT. de Tijuana, Calzada del Tecnológico 12950, Tomas Aquino, 22414 Tijuana, Baja California, México.

Resumen

En el presente estudio, se investigó el efecto de la estructuración nanométrica y morfología del óxido de zinc (ZnO) en películas a base de almidón con potencial aplicación biomédica en materiales para uso en úlceras diabéticas. La síntesis de las nanoestructuras de ZnO se realizó mediante el método solvotermal. La morfología fue caracterizada utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM). Se empleó el método de gelatinización para la síntesis de películas nanocompuestas de ZnO al 1, 3 y 5 %. Estas películas fueron caracterizadas mediante SEM, análisis mecánico dinámico (DMA), análisis termogravimétrico (TGA), espectroscopía infrarroja (IR) y por antibiograma. El DMA demostró que la adición de nanoestructuras mejora la relación esfuerzo – deformación de las películas aumentando el módulo elástico. El TGA mostró que la incorporación de las nanoestructuras modificó la resistencia de las películas de almidón a la descomposición. A través de IR se identificaron los grupos funcionales presentes en las películas compuestas. El antibiograma demostró que las películas poseen capacidad antimicrobiana contra *E. coli* y *S. aureus*.

Palabras Clave: Almidón, Biomaterial, Biomédica, Nanoestructuras, Óxido de zinc.

Abstract

In the present study, the effect of the nanometric structure and morphology of zinc oxide (ZnO) was investigated in starch-based films with potential biomedical applications in materials for use on diabetic ulcers. The synthesis of the ZnO nanostructures was carried out using the solvothermal method. The morphology was characterized using a scanning electron microscope (SEM). The gelatinization method was employed for the synthesis of 1, 3, and 5% ZnO nanocomposite films. These films were characterized using SEM, dynamic mechanical analysis (DMA), thermogravimetric analysis (TGA), infrared (IR) spectroscopy, and antibiogram. The DMA demonstrated that the addition of nanostructures improves the stress-strain relationship of the films, increasing the elastic modulus. The TGA showed that the incorporation of the nanostructures modified the resistance of the starch films to decomposition. Through IR, the functional groups present in the composite films were identified. The antibiogram demonstrated that the films possess antimicrobial capacity against *E. coli* and *S. aureus*.

Keywords: Starch, Biomaterial, Biomedical, Nanostructures, Zinc oxide.

1. Introducción

La diabetes mellitus es una enfermedad crónico-degenerativa (ECD) que provoca hiperglucemia debido a la ausencia o resistencia a la insulina en el organismo. Los dos tipos más prevalentes de diabetes son la diabetes tipo 1, en la cual el cuerpo es incapaz de producir insulina, y la diabetes tipo 2, caracterizada por una resistencia a esta hormona. Esta ECD se asocia con la mayor tasa de amputación de extremidades inferiores (es decir, piernas, tobillos y pies), como consecuencia de los elevados niveles de glucosa en

sangre que dañan los tejidos, destruyen los nervios y generan complicaciones, tales como infecciones o gangrena (es decir, muerte del tejido debido a la falta de irrigación sanguínea) (Berlanga, 2023).

El empleo de películas a base de almidón como material biomédico en el tratamiento de heridas crónicas asociadas a la diabetes presenta un notable potencial, debido a sus propiedades de barrera. Estas películas actúan como agentes protectores contra factores externos, tales como microorganismos dañinos (es decir, funcionan como una

*Autor para la correspondencia: balter.trujillo@tectijuna.edu.mx

Correo electrónico: brian.moreno193@tectijuana.edu.mx (Brian Alexis Moreno-Arellano), Yadira Cerda-Zumbada (yadira.cerda@tectijuana.edu.mx), gema.garcia@tectijuana.edu.mx (Gema Danira García-Olaiz), rmfelix2003@yahoo.com.mx (Rosa María Félix-Navarro), magu19121987@hotmail.com (María Alejandra González-Urías), azizumbo@tectijuana.mx (Arturo Zizumbo López), balter.trujillo@tectijuna.edu.mx (Balter Trujillo-Navarrete).

Historial del manuscrito: recibido el 01/09/2025, última versión-revisada recibida el 06/11/2025, aceptado el 07/11/2025, publicado el 12/12/2025. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial4.15829>

barrera contra bacterias), que podrían ocasionar complicaciones (Abotbina et al., 2021).

Durante la última década, la nanoestructuración de óxidos metálicos ha mejorado notablemente sus propiedades fisicoquímicas. Recientemente, se ha informado sobre el uso de nanoestructuras de óxidos metálicos (M_2O_x , donde x representa el estado de oxidación del metal) como refuerzo para películas de almidón con aplicaciones biomédicas. Por ejemplo, Peinghambardoust et al. (2019) sintetizaron nanoestructuras de plata (Ag), óxidos de zinc (ZnO) y óxidos de cobre (CuO). Al emplearlas como refuerzos en películas de almidón, se observó que estas nanoestructuras mejoraron significativamente las propiedades mecánicas y antimicrobianas de las películas.

Un óxido metálico de notable aplicación en el ámbito médico es el ZnO. Los cristales de ZnO se utilizan ampliamente en productos para el cuidado de la piel, tales como desodorantes, pastas para rozaduras e incluso como agentes astringentes y cicatrizantes. Según lo reportado por Sanz et al. (2024), el uso de vendajes, polvos o pastas que contienen ZnO produce efectos secantes, antiinflamatorios, antimicrobianos y de cicatrización, los cuales son efectivos en personas que padecen úlceras venosas o heridas quirúrgicas.

Con base en lo anterior, se identifica la necesidad de desarrollar un material compuesto de almidón reforzado con nanoestructuras de ZnO, con el fin de mejorar la eficacia de los tratamientos y reducir los tiempos de curación, aprovechando las propiedades de barrera de las películas de almidón y las destacadas propiedades biológicas del ZnO. En este trabajo se estudian las diferencias entre las nanoestructuras de ZnO (p.ej., varillas y bulto) y su efecto en las propiedades mecánicas (módulo elástico), térmicas (fases de descomposición) y microbianas (capacidad inhibitoria) de películas nanocompuestas a diferentes concentraciones de ZnO, con la finalidad de diseñar y desarrollar un nuevo material biomédico para agilizar el tratamiento de heridas crónicas en personas que padecen ECD.

2. Metodología

Todos los reactivos fueron adquiridos de Sigma-Aldrich®, utilizándose tal como se recibieron, sin purificación adicional: acetato de zinc dihidratado ($C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O$, 98%), almidón ($(C_6H_{10}O_5)_n$, 98%), bromuro de hexadeciltrimetilamonio ($C_{19}H_{42}BrN$, 99%), etilendiamina ($C_2H_8N_2$, 99%), glicerol ($C_3H_8O_3$, 99%), hexametilentetramina ($C_6H_{12}N_4$, 99%), Tritón X-100 (t -Oct- C_6H_4 -(OCH_2CH_2) $_x$ OH, $x = 9-10$, 99%), etanol (C_2H_6O , 99%), metanol (CH_3OH). Todas las soluciones se realizaron usando agua Milli-Q.

2.1. Preparación de películas de almidón

Las películas de almidón se sintetizaron mediante el método de gelatinización, el cual implica la absorción de agua por los gránulos de almidón, lo que provoca su ruptura y la formación de una pasta. Se colocaron 2.5 g de almidón en un matraz bola de 250 ml, añadiéndose 50 ml de agua en agitación constante. Posteriormente, se incorporó un 45 % (p/p) de almidón en glicerol. La mezcla resultante se calentó en un baño de aceite a 80 °C, manteniendo la agitación constante por 5 minutos, favoreciendo el desdoblamiento de las cadenas de

amilosa y amilopectina. El resulta en un polímero de apariencia viscosa y color blanco. Se transfirieron 10 g del producto obtenido en cajas Petri, las cuales se colocaron en un horno de convección a 50 °C durante 24 horas.

2.2. Preparación de nanoestructuras de ZnO

Las nanovarillas de ZnO se sintetizaron mediante el método solvotermal. Se preparó una solución de $C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O$ a una concentración de 1.37 mM en 4 ml de metanol, se añadieron 1.5 ml de Tritón X-100, ajustando el pH a 14 mediante la adición de KOH a 1.0 M. La solución resultante se mantuvo bajo agitación constante por 2 horas, tras lo cual se transfirió a un recipiente de teflón y se colocó en un reactor de síntesis solvotermal, siendo posteriormente sometida a un tratamiento térmico en un horno de convección a 200 °C durante 4 horas. Finalmente, se realizaron lavados con agua y etanol para eliminar los residuos de las sales precursoras. Las nanoestructuras de ZnO sintetizadas consistieron en nanovarillas y nanoprismas amorfs, de acuerdo con las metodologías reportadas en la literatura por Varghese et al. (2007) y Gramajo et al. (2021).

2.3. Preparación de películas nanocompuestas

Las películas de almidón-ZnO se fabricaron siguiendo procedimientos previamente establecidos. Se añadieron nanoestructuras de ZnO durante la etapa de calentamiento en baño de aceite, asegurando una dispersión homogénea en la matriz polimérica. Las concentraciones empleadas de fueron 1, 3 y 5 % (p/p) de nanoestructuras, dado que son valores comúnmente utilizados para reforzar de películas a base de almidón. Las películas nanocompuestas se etiquetaron como "Referencia" para el control, "ZnO-Varilla" para las películas con nanovarillas, y "ZnO-Bulto" para las películas con nanoestructuras amorfs.

2.4. Caracterización fisicoquímica y biológica

La morfología de las nanoestructuras de ZnO y la composición de las películas nanocompuestas se determinaron utilizando un equipo (Tescan®, Vega 3) operado a 11 kV en modo de alta resolución. Los grupos funcionales presentes en las películas nanocompuestas se analizaron mediante un espectrofotómetro (PekinElmer®, Spectrum FT-MIR y FT-NIR 400 Series). El rango de análisis se estableció en la región del infrarrojo medio (600 a 4500 cm^{-1}). El módulo de elasticidad por tensión de las películas nanocompuestas se evaluó a través de la técnica de tensión-deformación utilizando un equipo (TA Instruments®, DMA Q800). La rampa de tensión se fijó en 1.0 N/min hasta 18.0 N, manteniendo una temperatura constante de 25 °C. Las muestras se recortaron en tiras rectangulares con dimensiones de 39 mm x 5.9 mm x 0.1 mm. Las fases de descomposición de las películas nanocompuestas se determinaron empleando un equipo (TA Instruments, Discovery TGA). La rampa de calentamiento se estableció en 20 °C/min hasta los 600 °C. Se utilizaron muestras de 5.0 mg con forma cuadrada. La actividad antibacteriana de las películas nanocompuestas se determinó mediante la técnica de difusión en disco modificado (González et al., 2024), colocando muestras circulares de 3.5 cm de

diámetro de películas nanocompuestas sobre medios sólidos de agar Luria Bertani (LB) inoculados con una concentración de 1×10^6 unidades formadoras de colonias (UFC mL^{-1}) de las bacterias *Escherichia coli* (*E. coli*) gramnegativa y *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) grampositiva, dejándolas en un periodo de incubación durante 20 horas a 37 °C.

3. Resultados y discusiones

3.1. Microscopia electrónica de barrido

Se observó que la variación en la concentración de surfactante en la solución precursora de nanoestructuras de ZnO resulta en morfologías completamente distintas. Al unificar las metodologías de Varghese et al. (2007) y Gramajo et al. (2021), se lograron sintetizar dos tipos de nanoestructuras. Al emplear la metodología descrita anteriormente, se obtuvo una concentración alta de nanovarillas con morfologías y tamaños controlados, caracterizadas por una dimensionalidad 2D (es decir, largo, alto y ancho en escala nanométrica), ver la Figura 1a. Por otro lado, al eliminar completamente el surfactante de la solución precursora, se obtuvieron aglomerados de nanoprismas amorfos con tamaños y morfologías ligeramente variados, también con dimensionalidad 3D, ver Figura 1b.

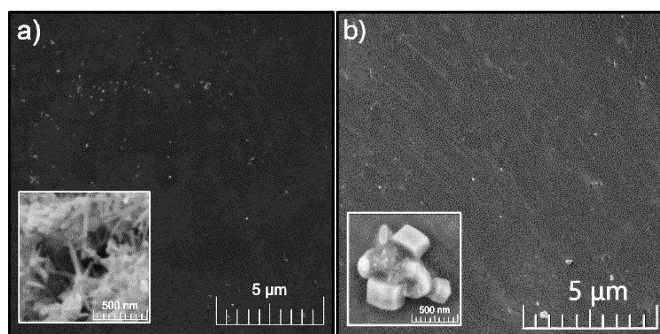


Figura 1. Micrografías SEM de superficie de películas con nanocompuestas y su respectiva nanoestructura de refuerzo a) tipo varilla, b) tipo bulto.

El análisis microscópico de las superficies de las películas nanocompuestas reveló que tanto las películas reforzadas con nanovarillas como aquellas con nanoprismas amorfos presentan una superficie completamente lisa, sin irregularidades. Además, las micrografías evidenciaron la presencia de pequeños puntos blancos inmersos en la película con una dispersión homogénea y uniforme en toda la matriz polimérica.

3.2. Espectroscopia infrarroja

El análisis de FT-IR mostró la presencia de grupos funcionales característicos del almidón en las películas nanocompuestas. Se observa una banda ancha e intensa alrededor de los 3300 cm^{-1} , correspondiente a la vibración de los grupos hidroxilo (O-H) presentes en las unidades de glucosa del almidón y en el glicerol. La señal en los 2900 cm^{-1} se atribuye a la vibración de los enlaces C-H presentes tanto en el almidón como en el glicerol. Además, la banda que se extiende de 900 a 1200 cm^{-1} corresponde a las vibraciones de los enlaces C-O y C-O-C. Al realizar una comparación entre la

muestra de referencia (línea negra) y una muestra reforzada con ZnO (línea azul), se observó una ligera disminución de la transmitancia y anchura en la señal del grupo funcional (O-H), relacionado a la adición de nanopartículas de ZnO, las cuales interactúan con los grupos hidroxilos presentes en el almidón, limitando la formación de enlaces (H-H), ver Figura 2.

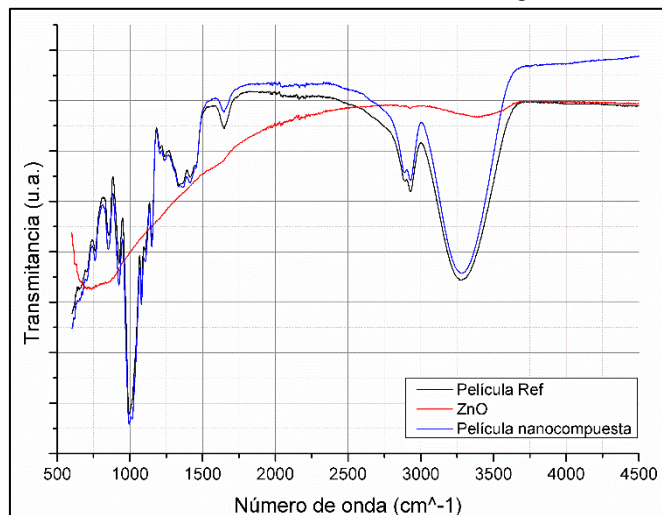


Figura 2. Espectros IR de películas de almidón referencia (negro), película de almidón nanoestructurada con ZnO (azul) y nanoestructuras de ZnO (rojo).

3.3. Análisis mecánico dinámico

El análisis mecánico dinámico reveló que la nanoestructuración de las películas induce cambios significativos al aumentar la concentración de nanoestructuras presentes en la película, ver Tabla 1. Se observó que todas las muestras nanoestructuradas presentan variaciones en su capacidad de deformación. Las muestras ZnO-Varilla 1 % y ZnO-Bulto 1 % evidenciaron un incremento en la deformación antes de la ruptura, acompañado de una ligera disminución en el esfuerzo. La muestra ZnO-Varilla 3 % mostró un aumento en la deformación mayor que la muestra anterior con 1 % de nanovarillas, manteniendo un esfuerzo muy similar al de la referencia. Por otro lado, la muestra "ZnO-Bulto 3 %" presentó un incremento altamente significativo tanto en el esfuerzo como en la deformación. Igualmente, las muestras ZnO-Varilla 5 % y ZnO-Bulto 5 % incrementaron significativamente su deformación máxima, alcanzando valores similares a la muestra "ZnO-Bulto 3 %". Mientras que la muestra con 5 % de nanovarillas mantuvo un comportamiento similar a la muestra de 3 % de nanoprismas, la muestra de 5 % de nanoprismas experimentó un decremento significativo, ver Figura 3.

Tabla 1. Valores de esfuerzo y deformación a la ruptura de las películas nanocompuestas

Muestra	% (p/p)	σ (MPa)	ε %
Referencia	No aplica	2.9 ± 0.3	4.8 ± 0.5
ZnO-Varilla 1%	1 %	2.6 ± 0.5	7.0 ± 1.5
ZnO-Bulto 1%	1 %	2.8 ± 0.3	11.5 ± 2.1
ZnO-Varilla 3%	3 %	2.8 ± 0.4	8.7 ± 2.2
ZnO-Bulto 3%	3 %	4.3 ± 0.6	27.1 ± 1.3
ZnO-Varilla 5%	5 %	3.9 ± 0.3	25.9 ± 1.0
ZnO-Bulto 5%	5 %	2.5 ± 0.2	25 ± 1.7

Los resultados sugieren que, al incorporarse un refuerzo, p. ej., ZnO en la matriz polimérica, se adhiere a las cadenas

poliméricas, actuando como nodos (i.e., punto donde se almacena energía potencial y se redistribuye) y variando para cada nanoestructura de ZnO. Esto se puede observar, cuando la película sufre un esfuerzo de tracción, la energía se transfiere a los nodos, redirigiendo de forma uniforme en toda la película, evitando la concentración de energía en los puntos más débiles, disminuyendo la aparición de grietas, incrementando su resistencia y flexibilidad (Newell, 2010).

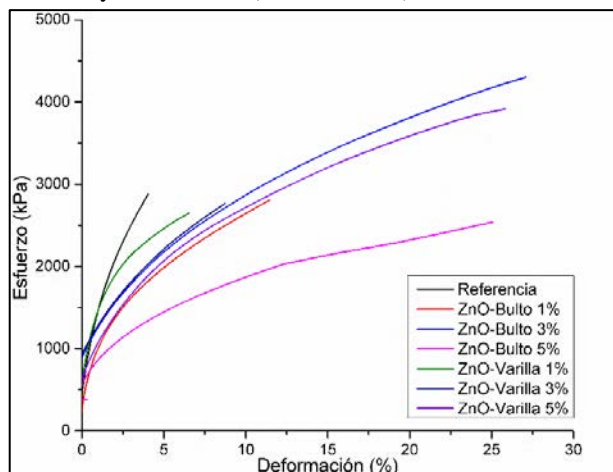


Figura 3. Gráfico de esfuerzo contra deformación de películas de almidón nanocompuestas con diferentes concentraciones de nanoestructuras de ZnO.

El análisis de los resultados de las pruebas mecánicas demostró que la adición de nanoestructuras puede aumentar la resistencia a la tracción de 2.9 hasta 3.9 MPa, la capacidad de deformación de 4.8 hasta 25.9 % de su longitud inicial en cuanto a las nanovarillas. Por su parte, con el material amorfo, también obtuvieron mejoras similares en la resistencia a la tracción y la capacidad de deformación. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Estevez et al. (2020), quienes examinaron las propiedades fisicoquímicas de películas de almidón de yuca reforzadas con nanovarillas de ZnO y PVA (alcohol polivinílico). Los cuales demostraron que la incorporación de los refuerzos mejora significativamente la relación esfuerzo-deformación, logrando un resultado casi el doble en comparación con la película de referencia. También, el estudio presentado por Delavari y Stiharu (2022), quienes sintetizaron y caracterizaron películas de almidón/PVA reforzadas con nanopartículas de ZnO, se evidenció que la adición de nanopartículas influye notablemente en la resistencia máxima a la tracción, incrementando los valores de 6.14 MPa en las películas sin refuerzo a hasta 16.31 MPa. Sin embargo, la deformación máxima disminuyó gradualmente con la adición de más nanopartículas, pasando de 210 % a 169 %.

3.4. Análisis termogravimétrico

El análisis térmico reveló un comportamiento similar en las etapas de degradación de las películas nanocompuestas en comparación con las muestras de referencia. La primera etapa se produjo entre aproximadamente 20 y 100 °C, donde comenzó la evaporación de la humedad presente en la muestra, resultando en una pérdida del 8 % del peso total. La segunda etapa ocurrió entre aproximadamente 100 y 250 °C, donde se inició la evaporación del glicerol de las películas y la degradación del almidón, con una pérdida aproximada del 25 % del peso total. La tercera etapa se desarrolló entre 250 y 400

°C; en esta fase, el glicerol presente en la película se evaporó completamente, y las cadenas poliméricas del almidón se descompusieron por completo, siendo las cadenas de amilosa (es decir, cadenas poliméricas lineales) las primeras en descomponerse, seguidas de la amilopectina (es decir, cadenas poliméricas ramificadas), lo que resultó en una pérdida de hasta el 85 % del peso total de la muestra. En la cuarta etapa, los residuos carbonizados del almidón se descompusieron por completo, dejando únicamente como residuo el nanomaterial utilizado como refuerzo en el caso de las películas nanocompuestas, mientras que la película de referencia se degradó por completo; esta etapa ocurrió entre 400 y 700 °C, ver Figura 4.

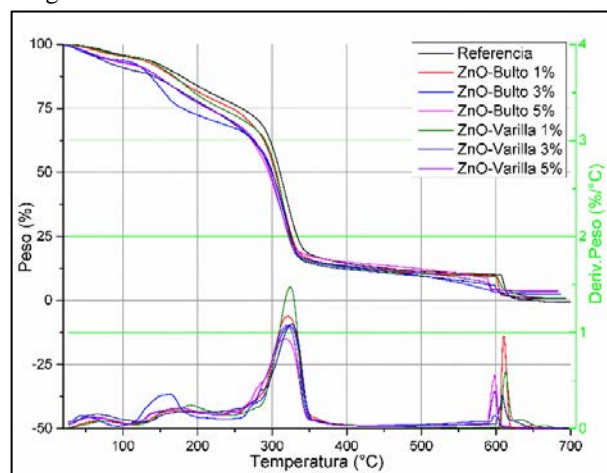


Figura 4. Termograma de pérdida de peso y derivada del peso con respecto a la temperatura de las películas de almidón nanocompuestas con diferentes concentraciones de nanoestructuras de ZnO.

De manera similar a las propiedades mecánicas, las nanoestructuras de ZnO actúan como un nodo de calor (i.e., punto de redistribución de energía), las nanoestructuras absorben el calor que fluye a través de la película y la redistribuyen. El aumento de la concentración de nanoestructuras de ZnO, permite un ligero desplazamiento la temperatura hacia la derecha aumentando ligeramente su resistencia térmica. La morfología juega un papel importante en la redistribución de calor, la alta relación de aspecto (longitud/diámetro) de las nanovarillas crea una red de nanoestructuras más uniforme y densa a comparación de los nanoprismas, esto permite que la distribución de calor sea más uniforme, retrasando la degradación del polímero (Askeland y Wright, 2017).

El análisis de los resultados térmicos demostró que al añadir nanoestructuras se aumenta ligeramente la estabilidad térmica en la etapa inicial de degradación 0 – 100 °C ya que presentan menos humedad inicial. Los resultados concuerdan con lo presentado por Zhu et al. (2021), quienes evaluaron las propiedades térmicas de nanocompuestos de almidón reforzados con nano-ZnO y nano-SiO₂ (dióxido de silicio). Estos autores observaron un comportamiento en las etapas de descomposición consistente con un pico de máxima degradación entre los 250 y 350 °C, y un residuo restante después de los 600 °C correspondiente a los nanomateriales de refuerzo añadidos a las películas. De manera análoga, el estudio de Fadeyibi et al. (2016) desarrollaron nanocompuestos a base de almidón-ZnO, investigando sus propiedades fisicoquímicas al variar el tamaño de la

nanopartícula. Los resultados expusieron un comportamiento similar entre la muestra de referencia y las películas con ZnO, demostrando que la concentración de nanopartículas influye directamente en la humedad de la muestra, ya que estas nanopartículas ocupan los espacios donde la humedad quedaría atrapada. Por consiguiente, en una etapa temprana de temperatura (i.e., 0 a 100 °C) no se observa una pérdida de masa.

3.5. Actividad antibacteriana in vitro de películas nanocompuestas

El análisis bacteriológico para *E. coli* reveló que las películas a base de almidón presentan un halo de inhibición del mismo tamaño del diámetro que presenta el disco de la película (35 mm). Se observó que tanto las muestras de referencia como aquellas con 1, 3 y 5 % de ZnO inhiben el crecimiento bacteriano en el área del medio de cultivo en contacto con la muestra, es decir, tienen un efecto bacteriostático (Figura 5 a). No obstante, para *S. aureus* se observa que la película de almidón con un 5% de nanoestructuras presentaron un halo de inhibición de 40 mm, evidenciando que a esta concentración se genera un efecto inhibitorio mayor a la referencia y las muestras con 1 y 3% de ZnO (Figura 5b).

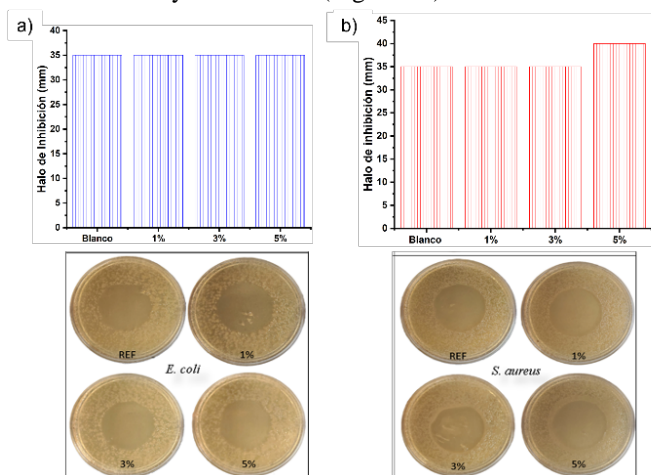


Figura 5. Actividad antibacteriana de películas de almidón nanoestructuradas con 1, 3 y 5 % de ZnO: a) *E. coli* (gram -) y b) *S. aureus* (gram +)

El análisis de los resultados microbiológicos demostró que las películas poseen una capacidad bacteriostática para *E. coli*, e incluso pueden tener un comportamiento bactericida para *S. aureus* al emplear concentraciones altas de nanoestructuras, lo cual evidencia que *S. aureus* presenta mayor susceptibilidad a la concentración de las nanoestructuras presentes en las películas en comparación a *E. coli*, este comportamiento es similar a lo reportado por Kumar et al. (2024) y Hu et al. (2019). Este fenómeno se puede atribuir a las variaciones en la composición de la pared celular entre ambas especies bacterianas. Algunos trabajos de investigación han informado sobre las propiedades antibacterianas de las nanoestructuras de ZnO contra cepas bacterianas tanto grampositivas como gramnegativas.

En el trabajo realizado por Mirjalili y Yassani (2017) se prepararon y caracterizaron películas de almidón con nanopartículas de ZnO y los resultados demostraron que las películas que contienen ZnO exhiben actividad antibacteriana, presentando halos de inhibición de hasta 28 mm para *E. coli* y

24 mm para *S. aureus*. De manera similar, Jinxia et al. (2016) sintetizaron nanocompositos de almidón-ZnO y evaluaron su capacidad antibacteriana contra *S. aureus* y *E. coli*. Los resultados indicaron que las cepas de *E. coli* no mostraron zonas de inhibición aparentes en presencia del nanocomposito; sin embargo, al evaluar los nanocompositos frente a *S. aureus*, se observaron zonas de inhibición alrededor de las muestras. El resultado sugiere que las nanopartículas de ZnO pueden liberar iones de zinc, generar especies reactivas de oxígeno y dañar la membrana, factores que contribuyen a sus propiedades antibacterianas. Donde, la matriz orgánica actúa como portador, permitiendo que el ZnO se disperse e interactúe con las bacterias en la superficie de la película o en su proximidad inmediata.

En resumen, al agregar nanoestructuras a la matriz polimérica de las películas nanocompuestas, se producen interacciones intermoleculares que mejoran sus propiedades. La formación de enlaces H-H entre O-H crea una red molecular más densa y fuerte. La dispersión uniforme de las nanoestructuras genera puntos de anclaje que aumentan la resistencia a la tracción y la capacidad de deformación, y mejoran la resistencia térmica al redistribuir el calor de manera uniforme. Las nanovarillas, con su mayor relación de aspecto, ofrecen una interfaz más grande que permite una transferencia de carga más eficiente, actuando como puentes que distribuyen la tensión de forma efectiva. Su forma alargada también proporciona un mejor anclaje mecánico, restringiendo el movimiento de las cadenas poliméricas, lo que mejora la resistencia a la tracción, la rigidez y la estabilidad térmica del material.

4. Conclusiones

Se logró sintetizar y adicionar nanoestructuras de ZnO a películas de almidón plastificadas con glicerol. La caracterización fisicoquímica demostró que la adición de nanoestructuras es totalmente homogénea en toda la matriz polimérica. La relación esfuerzo – deformación se vio afectado por el tipo de nanoestructura y la concentración, siendo los mejores resultados con 3 % de nanoprismas amorfos y 5 % de nanovarillas. Hubo una mejora en las propiedades térmicas de obteniendo un ligero aumento en la resistencia térmica, manteniendo sus propiedades funcionales. Finalmente presentaron una excelente capacidad bacteriostática, inhibiendo completamente el crecimiento de *E. coli* y *S. aureus* en el área bajo la muestra. Estos resultados resaltan el potencial de las películas a base de almidón nanoestructuradas con ZnO como material biomédico para el tratamiento de heridas crónicas en personas con ECD.

Agradecimientos

Secretaría de Educación Pública y al Tecnológico Nacional de México/TI Tijuana (TecNM) por el apoyo recibido. Brian Alexis Moreno-Arellanes (CVU 1333903) agradece a SECIHTI por la beca para la Maestría en Ciencias de la Ingeniería.

Referencias

- A. Fadeyibi, Z.D. Osunde, G. Agidi, P.A. Idah, E.C. Egwim, Development and Optimisation of Cassava Starch-Zinc-Nanocomposite Film for Potential Application in Food Packaging, *J. Food Process. Tech.* 7 (6) (2016) 1000591.
DOI: <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000591>
- Abotbina, W., Sapuan, S. M., Sultan, M. T. H., Alkbir, M. F. M., & Ilyas, R. A. (2021). Development and Characterization of Cornstarch-Based Bioplastics Packaging Film Using a Combination of Different Plasticizers. *Polymers*, 13(20), 3487.
DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13203487>
- Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales*. México, DF: CENGAGE learning.
- Berlanga Medina, S. (2023). Sistema de medición de heridas para registro del pie diabético.
- Delavari, M. M., & Stiharu, I. (2022). Preparing and Characterizing Novel Biodegradable Starch/PVA-Based Films with Nano-Sized Zinc-Oxide Particles for Wound-Dressing Applications. *Applied Sciences*, 12(8), 4001.
DOI: <https://doi.org/10.3390/app12084001>
- F. Mirjalili, A. Yassini Ardekani, Preparation and characterization of starch film accompanied with ZnO nanoparticles, *J. Food Process Eng.* 40 (6) (2017) 12561.
DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12561>
- Gramajo, M. L. (2021). Parámetros que afectan el crecimiento de nanoestructuras de ZnO por síntesis hidrotérmica (Doctoral dissertation, Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Tucumán).
- González Ayón, M., Mena Hoppenstedt, A., Zizumbo López, A., Bernaldez Sarabia, J., Licea Claverie, A., González Urías, M. A. (2024). Semi-Interpenetrated Polymer Networks Based on PHEMA and Modified Chitosan as a Potential Bactericide Hydrogel for Wound-Healing. *Macromol. Chem. Phys.* 225 (12).
DOI: <https://doi.org/10.1002/macp.202400018>
- Hu X, Jia X, Zhi C, Jin Z, Miao M. (2019) Improving the properties of starch-based antimicrobial composite films using ZnO-chitosan nanoparticles. *Carbohydr Polym.* 210, 204–209.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.01.043>
- Jinxia. Ma, W. Zhu, Y. Tian, Z Wang, Preparation of Zinc Oxide-Starch Nanocomposite and Its Application on Coating, *Nanoscale Res. Lett.* 11 (1) (2016) 1–9.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1404-y>
- Kumar P, Gautam S, Bansal D, Kaur R. (2024). Starch-based antibacterial food packaging with ZnO nanoparticle. *J Food Sci Technol.* 61(1), 178-191.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05834-9>
- Newell, J. (2010). *Ciencia de materiales-aplicaciones en ingeniería*. Alfaomega Grupo Editor.
- Peighambaroust, S. J., Peighambaroust, S. H., Pournasir, N., & Mohammadzadeh Pakdel, P. (2019). Properties of active starch-based films incorporating a combination of Ag, ZnO, and CuO nanoparticles for potential use in food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100420.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.100420>
- S. Estevez-Areco, L. Guz, R. Candal, S. Goyanes, Active bilayer films based on cassava starch incorporating ZnO nanorods and PVA electrospun mats containing rosemary extract, *Food Hydrocolloids* 108 (2020) 106054.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106054>
- Sabir, Sidra, Arshad, Muhammad, Chaudhari, Sunbal Khalil, Zinc Oxide Nanoparticles for Revolutionizing Agriculture: Synthesis and Applications, *The Scientific World Journal*, 2014, 925494, 8 pages, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/925494>
- Sanz González, L. (2024). Óxido de zinc en el tratamiento de las heridas crónicas.
- Varghese, N., Panchakarla, L. S., Hanapi, M., Govindaraj, A., & Rao, C. N. R. (2007). Solvothermal synthesis of nanorods of ZnO, N-doped ZnO and CdO. *Materials Research Bulletin*, 42(12), 2117–2124.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2007.01.017>
- Wen, B., Huang, Y., & Boland, J. J. (2007). Controllable Growth of ZnO Nanostructures by a Simple Solvothermal Process. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(1), 106–111.
DOI: <https://doi.org/10.1021/jp076789i>
- Zhu, J., Gao, W., Wang, B., Kang, X., Liu, P., Cui, B., & Abd El-Aty, A. M. (2021). Preparation and evaluation of starch-based extrusion-blown nanocomposite films incorporated with nano-ZnO and nano-SiO₂. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 1371–1378.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.118>