

# NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS PARA APLICACIONES EN EMPAQUES DE ALIMENTOS: UNA REVISIÓN

*Fecha de aceptación: 01/07/2024*

### **S. Sánchez-Valdés**

Centro de Investigación en Química  
Aplicada  
Coahuila de Zaragoza, México

### **A. Rodríguez-González**

Centro de Investigación en Química  
Aplicada  
Coahuila de Zaragoza, México

### **J. Torres-González**

Centro de Investigación en Química  
Aplicada  
Coahuila de Zaragoza, México

### **A.D. García-Montenegro**

Centro de Investigación en Química  
Aplicada  
Coahuila de Zaragoza, México

### **C. Gómez-Rodríguez**

Centro de Investigación en Química  
Aplicada  
Coahuila de Zaragoza, México

### **I.L. González-Maldonado**

Centro de Investigación en Química  
Aplicada  
Coahuila de Zaragoza, México

### **P. A. Espinoza-Martinez**

Centro de Investigación en Química  
Aplicada  
Coahuila de Zaragoza, México

### **A.B. Espinoza-Martinez**

Centro de Investigación en Química  
Aplicada  
Coahuila de Zaragoza, México

### **A. Herrera-Guerrero**

Centro de Investigación en Química  
Aplicada  
Coahuila de Zaragoza, México

### **L. Da Silva**

Centro de Investigación en Química  
Aplicada  
Coahuila de Zaragoza, México

**RESUMEN:** El aumento sistemático del consumo de alimentos en el mundo ha repercutido en la cantidad de envases utilizados en la industria alimentaria. La mayor parte de los materiales que se emplean para el empaque de alimentos no suelen ser biodegradables. Por lo que, esta situación representa un riesgo para el medio ambiente, dado que el número de residuos aumenta considerablemente, los cuales tienen la característica principal de no degradarse en tiempos cortos. Con el objetivo de abordar esta problemática y desarrollar materiales “verdes”, se han investigado distintos biopolímeros, sin

embargo, debido al bajo desempeño de sus propiedades mecánicas y de barrera, no han podido ser utilizados para reemplazar a los materiales tradicionales plásticos. El uso de nanopartículas favorece interacciones con la matriz polimérica debido a las dimensiones del reforzamiento. Por lo que surgen así los nanocompuestos poliméricos (PNCs) para su aplicación como biomateriales. Los PNCs pueden llegar a ofrecer las funcionalidades deseadas y cumplir con las propiedades objetivo para su aplicación en empaques de alimentos. En esta revisión se exploran las mejoras en propiedades físicas, estudiando su actividad microbiana (¿anti o micro?), biodegradabilidad, su potencial como biosensores, su desempeño como barrera para gases y sus interacciones con diferentes matrices poliméricas.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la competencia en los mercados globales y en la variedad de productos, aunado con las exigencias de los consumidores en diversas áreas como en la industria de los alimentos, ha propiciado a las compañías a investigar nuevos métodos para mejorar la eficiencia y capacidad de la manufactura de empaques con el uso de materiales sostenibles. Los recientes avances en la nanotecnología como los nanomateriales, ofrecen nuevas oportunidades a las industrias alimentarias para promover la mejora continua en sus esquemas de proceso, empaque y manufactura. Por lo que los materiales de empaque están cambiando constantemente, debido al desarrollo de nuevos productos, tecnología y procesos. Entre los materiales utilizados se encuentran el vidrio, el papel, el cartón, la hojalata, el aluminio y los plásticos.

Los plásticos son ampliamente utilizados en la fabricación de empaques, ya que presentan algunas características requeridas como: la transparencia, el buen desempeño de propiedades mecánicas y la estabilidad térmica. Algunos de los plásticos más empleados en la elaboración de empaques son: el tereftalato de polietileno (PET), cloruro de polivinilo (PVC), polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y poliamida (PA). Sin embargo, al no ser totalmente reciclables ni biodegradables, impactan negativamente al medio ambiente y en algunos casos, los costos de su manufactura son elevados. (Referencia de esta parte no estaban)

En las últimas dos décadas, ha surgido un creciente interés en el desarrollo de polímeros a partir de materiales biodegradables, con el objetivo de reducir la producción de materiales sintéticos no degradables, los cuales representan un gran porcentaje de los desechos generados a nivel mundial. Así mismo, se busca añadir propiedades activas a los sistemas de envasado de alimentos como propiedades antimicrobianas y de barrera de humedad, entre otros [1].

Los biopolímeros o bioplásticos difieren de los plásticos sintéticos debido a que están compuestos de materiales orgánicos y su degradación se produce por microorganismos bajo condiciones adecuadas de temperatura, humedad y de disponibilidad de oxígeno, lo cual evita la producción de toxinas dañinas para el ambiente [1]. Estos se pueden clasificar

según su fuente o aplicación en biobasados y biodegradables. Los materiales biobasados tienen su origen en fuentes naturales y también a través de reacciones de polimerización. Por otra parte, los plásticos biodegradables tienen la capacidad de degradarse a través de la exposición a condiciones ambientales específicas de presión, temperatura, oxígeno y radiación UV, lo que provoca un rompimiento de cadenas poliméricas hasta reducir su peso molecular en un rango de 3000-5000 g/mol, pero ¿por qué en ese rango de peso molecular? Resulta que, en el rango de peso molecular mencionado los microorganismos pueden asimilar los restos de los microplásticos lo que facilita su descomposición y reducción en compuestos más simples. Adicionalmente, ambos tipos de biopolímeros pueden ser modificados por medio de la nanotecnología, lo que abre nuevas posibilidades de optimizar los procesos de manufactura, ya que la combinación de nanopartículas con matrices poliméricas mejora las propiedades objetivo del material, permitiendo desarrollar envases más eficientes y sostenibles, para mejorar no sólo las propiedades del material, sino también la relación costo-beneficio [2].

## **NANOMATERIALES Y NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS**

Los nanomateriales pueden ser de origen natural o sintético y pueden presentarse en forma de partículas sueltas o formar un agregado. Presentan una o más dimensiones con tamaños comprendidos entre 1 y 100 nm, dichas estructuras presentan una alta proporción de superficie-volumen [3]. Esta característica los hace ideales para diversas aplicaciones que involucran materiales compuestos, reacciones químicas, liberación controlada de sustancias en tecnologías de envase activo, entre otras.

Los nanomateriales se clasifican en tres tipos dependiendo de las dimensiones nanométricas [4]:

- De dos dimensiones (nanofibras y nanotubos de carbono), para conferir propiedades físicas como la resistencia y rigidez para los empaques en distintas industrias.
- Nanocapas delgadas, proporcionan mayor rendimiento en las propiedades de barrera. El recubrimiento puede ser alrededor de 50 nm de espesor, considerado entonces como nanomaterial de una dimensión.
- De tres dimensiones, como las nanopartículas que tienen gran potencial para liberar o capturar productos químicos, como las usadas para la recolección de residuos en la eliminación de oxígeno o de productos químicos.

Otra clasificación para los nanomateriales se basa en las normas ISO TS 27687:2008 e ISO TS 80004:2011, las cuales tienen como objetivo mitigar la ambigüedad de los conceptos de la nanotecnología.

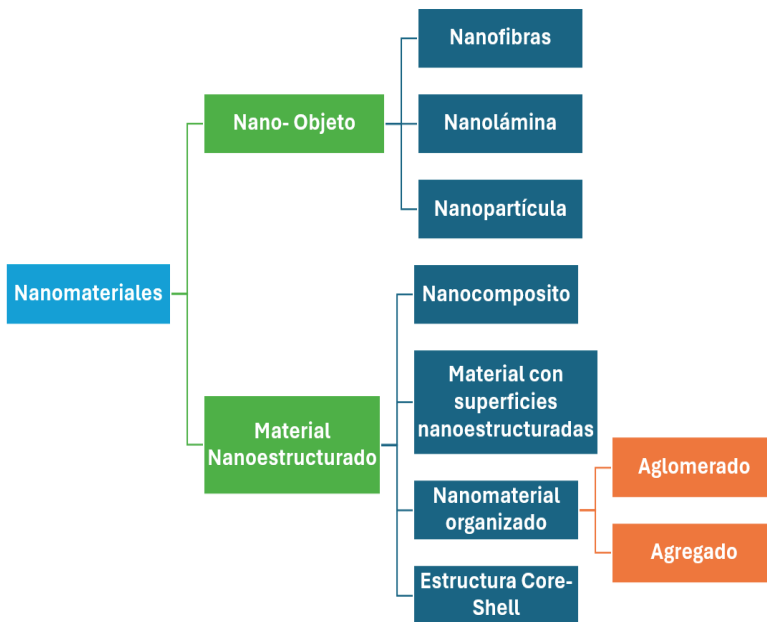


Figura 1. Clasificación de nanomateriales para la obtención de nanocompuestos . Basado en [5].

La incorporación de nanomateriales ha dado origen a nuevas y mejores propiedades en los polímeros como la capacidad antiolor, retardante de flama, protección UV, resistencia al agua, antirayado y propiedades de barrera. Existen diferentes métodos para la elaboración de nanocompuestos, los cuales tienen como objetivo integrar adecuadamente las nanopartículas en la matriz polimérica.

A continuación, se presentan los principales métodos utilizados para la elaboración de nanocompuestos [6]:

- Incorporación de las nanopartículas dentro de una matriz polimérica mediante mezclado mecánico o mezclado en fundido.
- Adición de las nanopartículas dentro de una matriz polimérica por medio de mezclado en solución.
- Polimerización in—situ de las nanopartículas en la matriz polimérica.

Los nanocompuestos poliméricos consisten en la combinación de una matriz polimérica y la incorporación de cargas con dimensiones nanométricas. Donde la adición de nanopartículas con una alta relación de aspecto, son de particular importancia debido a su alta superficie específica que proporciona una mejora significativa en el desempeño del nanocompuesto [4].

La selección de las cargas utilizadas para la elaboración de nanocompuestos, está basada principalmente en la morfología y estructura nanométrica. Existen diversos

factores que modifican las propiedades del nanocompuesto de acuerdo con su aplicación, algunos de ellos son: el tipo de polímero, la cantidad añadida, la dispersión de la carga y la condición de adición. La dispersión es uno de los factores de mayor importancia, dado que una dispersión uniforme de las nanopartículas genera un área interfacial matriz-refuerzo muy grande, esto ocasiona un cambio en la movilidad molecular y la relajación de la molécula. Por lo general, esto resulta en el incremento de la resistencia mecánica, estabilidad térmica, resistencia química, apariencia superficial, conductividad eléctrica, transparencia y permeabilidad a gases.

## **INVENCIÓN E INNOVACIÓN DE NUEVOS MATERIALES**

El desarrollo de nuevos materiales poliméricos en diversas áreas de aplicación representa un desafío continuo. El diseño de nuevos materiales está basado en las propiedades intrínsecas de los materiales para determinadas aplicaciones, sin embargo, también se ha comenzado a considerar al usuario en el proceso creativo de un producto, considerando el simbolismo, la morfología, el concepto y la manufactura del material [7].

Los nuevos materiales pueden surgir por invención (desarrollo desde cero) o por innovación (mejoramiento de un material existente), los principales métodos para el desarrollo de nuevos materiales se pueden resumir en:

- La síntesis de nuevos polímeros/biopolímeros: Deben de incluir un nivel de madurez tecnológica que contenga estudios de factibilidad, desarrollo, demostración y pruebas de sistemas operativos.
- La incorporación de aditivos: comprende agentes espumantes, retardantes a la flama y pigmentos/colorantes que ayudan a mejorar propiedades.
- La adición de cargas: Cuyo objetivo además de mejorar propiedades, busca reducir costos y propiciar la degradabilidad después de su vida útil.

## **MEZCLAS POLIMÉRICAS Y COMPATIBILIZACIÓN DE NANOCOMPUESTOS**

Las mezclas poliméricas son nuevos materiales resultantes de la combinación de dos o más polímeros o copolímeros, lo que da lugar a propiedades sinérgicas que provienen de cada componente. Este método resulta interesante ya que es fácil y rentable para el desarrollo de nuevos materiales, además, se pueden manipular las propiedades del material final para aplicaciones específicas [8]. En general, en las mezclas de dos o más polímeros estructuralmente diferentes, se pueden esperar interacciones dipolares, fuerzas de Van der Waals o enlaces de hidrógeno, sin embargo, no todos los polímeros tienen la capacidad de mezclarse de manera eficaz y sencilla [9]. Este tipo de mezclas o la adición de cargas puede ser un tema realmente complicado, debido a la entropía del mezclado derivado de la segunda ley de la termodinámica. La cual establece que cuando las cosas cambian, lo hacen de un estado ordenado a uno desordenado, por lo que lograr que las

cosas cambien en un sentido desordenado es muy complicado [10]. Desde el punto de vista termodinámico, las mezclas poliméricas se clasifican en mezclas miscibles, parcialmente miscibles o inmiscibles, ya que dependen del valor de la energía libre de Gibbs, que explica la espontaneidad de mezclado.

En la actualidad, las mezclas poliméricas inmiscibles han generado un creciente interés debido al fenómeno de compatibilización, que permite la unión con puntos de anclaje entre las interfaces de los polímeros. Este fenómeno interfacial involucra una frontera de contacto entre los materiales y una zona de transición difusa, mismas que aplican con la adición de nanomateriales. Se puede decir que mientras sea mayor la compatibilización en los nanocompuestos, mayor será el incremento de las propiedades finales del material.

En general, para lograr un buen procesamiento, compatibilización y morfología de un nanocompuesto, es crucial considerar varios factores durante el diseño y desarrollo de una mezcla o la incorporación de nanomateriales en un polímero, como las propiedades intrínsecas de cada componente, las proporciones, sus estados de agregación y viscosidades, por mencionar algunos. Considerar estos factores durante el diseño y desarrollo de un nanocompuesto puede ayudar a optimizar sus propiedades y aplicaciones finales.

## **NANOCOMPUESTOS EN APLICACIONES EN EMPAQUES DE ALIMENTOS**

El empaque de alimentos tiene por objetivo asegurar la protección y preservación de la calidad de los productos, desde su producción hasta llegar al consumidor, por lo tanto, el diseño de un empaque debe considerar no solo al consumidor, sino también facilitar el transporte, la manipulación y conservación del producto [11], además, debe de contar con propiedades específicas para presentar un buen desempeño ante las condiciones de uso y aplicación. Actualmente, la nanotecnología ha desempeñado un papel importante en el desarrollo e innovación de nuevos nanomateriales utilizados para la manufactura de empaques de alimentos, ofreciendo nuevas oportunidades para mejorar las propiedades específicas de aplicación, así como optimizar el proceso de fabricación de empaques o películas para alimentos [5].

Los nanocompuestos tienen la particularidad de que, al poder manipular su composición, se pueden evitar cambios en la densidad o fluidez de la película, así como para no afectar otras propiedades importantes como la transparencia, otorgarles propiedades antimicrobianas, antioxidantes, y capacidad de absorción de  $O_2$  y vapor de agua.

Los nanocompuestos utilizados en el empaque de alimentos se pueden clasificar en distintas categorías de acuerdo con sus propiedades y funciones [5]:

- **Mejorados:** Las nanopartículas presentes en la matriz polimérica mejoran las propiedades de flexibilidad, efecto barrera y estabilidad temperatura/mezcla.

- **Activos:** Las nanopartículas permiten la interacción con el alimento y el medio, dando lugar a una mejor preservación, su función principal es cambiar la naturaleza, composición o atmósfera que rodea al alimento.
- **Inteligentes:** Utilizan nanodispositivos para monitorizar las condiciones del alimento y del ambiente del empaque.
- **Biocidas:** Buscan mantener las condiciones higiénicas de la superficie del alimento, reduciendo y previniendo el crecimiento microbiano, estos no deben de tener un efecto negativo en el alimento.

En la actualidad se han desarrollado dos métodos para la elaboración de nanomateriales poliméricos empleados en la manufactura de empaques o películas en la industria alimentaria. Uno de ellos consiste en la fabricación de materiales poliméricos en nanoescala, mientras que el otro implica la introducción de partículas nanométricas en una matriz polimérica [5].

Para el segundo método, la partícula nanométrica proporciona al nanocompuesto propiedades como flexibilidad, permeabilidad, estabilidad térmica y reforzamiento de la matriz siempre y cuando la cantidad de carga sea baja (alrededor del 5%). Esto se debe a que este porcentaje no solo suele presentar pocos cambios en la densidad o transparencia de la película, si no también, mejorar las propiedades de superficie y de reciclado.

Por otra parte, es bien sabido que, durante los últimos años la producción y aplicación de los materiales plásticos han aumentado de manera significativa, generando una creciente demanda mundial. Así mismo, el incremento en la manufactura de polímeros ha dado lugar a una inmensa cantidad de desechos postindustriales y postconsumo, lo cual ha impactado de manera negativa al medio ambiente. Este problema se agrava debido a la falta de interés en la adecuada disposición y selección de los mismos, sin dejar de lado que se requieren cientos de años para que ciertos materiales logren descomponerse por completo bajo condiciones ambientales naturales [12]. Por ejemplo, el uso de plásticos de un solo uso ha contribuido significativamente a esta problemática ambiental. Para abordar esta problemática, se ha buscado a través del uso de la nanotecnología y las mezclas poliméricas, desarrollar materiales amigables con el medio ambiente, que cuenten con propiedades de biodegradabilidad, sin afectar el desempeño del resto de las propiedades requeridas para su aplicación [13].

La biodegradabilidad es una propiedad proveniente de una subclasificación de los materiales plásticos conocidos como biodegradables y biobasados. Se define como la capacidad de un material polimérico para degradarse con la exposición a condiciones ambientales una vez concluido su tiempo de vida. Este concepto es altamente aplicable a los empaques de alimentos debido a su corto tiempo de vida en contacto con alimentos. En seguida, se enlistan algunos polímeros biodegradables más utilizados en la industria del empaque de alimentos:

- **Poliésteres:** Son extraídos de la biomasa, se fabrican por síntesis clásica y se degradan por acción de microorganismos y bacterias.
- **Copolímeros alifáticos-aromáticos:** Son blandos y flexibles, con alta resistencia térmica, el monómero alifático propensa la degradación química mediante hidrólisis. Si la degradación es completa, tarda 8 semanas, si es incompleta, puede tardar hasta 50 años.
- **Copolímeros alifáticos de polilactida (CPLA):** Son fáciles de obtener y térmicamente estables, generan menores emisiones de dióxido de carbono y no producen sustancias tóxicas, su degradación se completa en 12 meses.
- **Policaprolactona (PCL):** Es totalmente biodegradable, resistente al agua y solventes, es fácil de procesar, aunque no se emplea solo en alimentos, se usa mezclado con almidón en la industria alimentaria.
- **Ácido poliláctico (PLA):** Es un polímero prometedor, versátil, reciclable, compostable, de alta transparencia, buena procesabilidad y resistencia a disolventes.

Como se mencionó anteriormente, con la creciente preocupación por el impacto perjudicial de los plásticos sobre el medio ambiente y el largo tiempo que toman en degradarse, ha aumentado interés en el desarrollo de polímeros que se degraden en tiempo cortos, sobre todo aquellos de un solo uso como empaques alimentos. Por lo que se ha estudiado la incorporación de diferentes nanopartículas en la fabricación de nanocompuestos con propiedades de biodegradabilidad mejoradas, entre las cuales destacan, la nanoarcillas, nanofibras de celulosa, nanotubos de carbono, nanopartículas de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y sulfuro de zinc ( $\text{ZnS}$ ).

## NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS BASADOS EN ARCILLAS

Las arcillas son refuerzos conocidos por mejorar el desempeño de los polímeros, son altamente atractivos debido a su alta abundancia, incremento en estabilidad térmica, resistencia al fuego, e incrementan las propiedades mecánicas, físicas, de intercalación, así como su afinidad a moléculas orgánicas debido a su nanoestructura intrínseca. Son fáciles de procesar y su alta abundancia y propiedades no tóxicas hacen posible que el escalamiento de este compuesto resulte económicamente viable y amigable con el medio ambiente. [5,14]

Se emplean tres principales refuerzos a base de arcilla en nanocompuestos poliméricos:

- **Arcilla de Montmorillonita:** Es una arcilla estratificada que consiste en láminas de alúmina-silicato hidratada, consiste en una lámina octaédrica de hidróxido de aluminio compartida en el borde entre dos capas tetraédricas de sílice, lo cual facilita su inclusión en la matriz polimérica. (Weiss, et al., 2006) [14]



- Arcilla Laponita: Es un silicato laminar que presenta una relación de aspecto mayor que la montmorillonita.
- Bionanocompuestos: Estos compuestos están formados por un polímero biodegradable con un nanomaterial. Requieren menos combustible para su producción y son amigables con el medio ambiente. Tienen la capacidad de proteger el alimento, prolongando su tiempo de vida.

Las arcillas han sido estudiadas para su uso como nanocargas en empaque de alimentos para combatir el impacto negativo de los plásticos en el medio ambiente, mostrando resultados positivos. Estudios han revelado que el uso de montmorillonita es dominante en el empaque de alimentos, sin embargo, presenta el inconveniente de que su superficie hidrófila dificulta una dispersión homogénea en polímeros orgánicos, esto puede ser solucionado sustituyendo los cationes inorgánicos a partir de iones cuaternarios de sales de amonio o añadiendo agentes compatibilizantes. Además, se ha estudiado el impacto ambiental de los nanocompuestos a base de almidón funcionalizados con silicatos en capas y montmorillonita, los cuales presentan buena intercalación y un límite bajo de migración [15]. También, se han realizado pruebas de citotoxicidad en arcillas modificadas con silanos, mismos que han demostrado que los modificadores de arcilla como el 3-aminopropyltriethoxysilane presentan citotoxicidad, mientras que la modificación con vinyltrimethoxysilane no muestra efectos tóxicos [16].

La incorporación de nanoarcillas en matrices poliméricas, han presentado un buen desempeño en la barrera a los gases, fomentando la separación de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> mediante estructuras bidimensionales. Kim et al. lograron producir recubrimientos flexibles semi-transparentes con barreras a gases autoensambladas a base de nanocompuestos de montmorillonita/polivinilpirrolidona (PVP), que eficientemente impiden la permeación de H<sub>2</sub> [17,18].

Varias empresas han desarrollado nanocompuestos basados en matrices poliméricas de nylon adicionando montmorillonita, comercializándolos como Durethan RKU2-2601 (Nanocor™). Estos nanocompuestos tienen aplicaciones en el envasado de bebidas alcohólicas saborizadas o en botellas de PET con multicapas de nanocompuestos para cerveza y bebidas carbonatadas [19]. Entre los estudios realizados se encuentra la incorporación de nanoarcillas a una matriz de poliamida 6 para envasar lomos vacunos al vacío, los autores reportaron un incremento en las propiedades de empaque y en las propiedades de barrera ante el O<sub>2</sub> y la luz UV [20]. Además, se realizaron pruebas de nanocompuestos antifúngicos de montmorillonita con extractos de residuos de piel de granada por intercalación simple y se comprobó su efectividad in vitro e in vivo ante el hongo *Botrytis cinerea* [21].

Por otra parte, el crecimiento bacteriano y la acción enzimática son las principales causas del deterioro de las carnes frescas, lo que promueve la emisión de amonio y otros compuestos volátiles que alteran el pH del ambiente dentro del empaque. Este principio, se

aprovecha para el diseño de empaques inteligentes. Se conoce como empaque inteligente a todo aquel sistema de empaque de alimentos que es capaz de monitorear la calidad de los alimentos mediante indicadores colorimétricos que proporcionan información visual directa al consumidor sobre la frescura y la calidad de los alimentos envasados a través del monitoreo de los cambios en el pH del producto. Por lo ello, se ha investigado el impacto de películas a base de mezclas poliméricas de PVA/almidón de amilosa (HAS) reforzadas con montmorillonita y activadas con antocianinas. Los resultados demostraron que la adición de montmorillonita incrementó la estabilidad térmica, resistencia al agua, parámetros de color y redujo la permeabilidad de vapor. Además, se encontró que la película presenta actividad antimicrobiana, antioxidante y una respuesta significativa al cambio de pH [22].

## **NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS BASADOS EN NANOTUBOS DE CARBONO (CNT'S)**

Los nanotubos de carbono multicapa (MWCNT's) presentan un alto módulo elástico y fuerza tensil. Son utilizados en gran manera por su efecto antimicrobiano, lo que los hace excelentes candidatos para su aplicación en empaques de alimento. Sin embargo, tienden a migrar hacia agentes orgánicos presentes en la comida y llegan a acumularse en órganos de manera que pueden interrumpir procesos metabólicos, similar al efecto de punción en órganos que presentan los asbestos. [23]

Se ha reportado la incorporación de nanotubos de carbono en matrices poliméricas de poli(3-hidroxi butirato)-co-(3-hidroxi valerato) (PHVB), un material 100% biodegradable, los cuales presentaron una mejora en las propiedades mecánicas, eléctricas y de barrera, así como un aumento en la cristalización del PHVB, debido al efecto nucleante de los CNT's sobre la matriz polimérica.

Otros estudios, han demostrado que la incorporación de PHBV-g-MWCNT's en una matriz polimérica de PHBV, promovió la disminución absorción de agua y permeabilidad al vapor de agua, además, presentaron una mayor ventana de procesamiento de fusión [24]. Otros trabajos, han reportado un incremento en la elongación a la ruptura, la fuerza tensil, y una disminución en la velocidad de degradación térmica en mezclas de ácido poliláctico (PLA)/polietilenglicol (POM)/CNT's [25].

## **NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS BASADOS EN NANOPARTÍCULAS DE QUITOSANO**

La quitina, es el segundo biopolímero natural más abundante junto con la celulosa, sus fuentes principales son los exoesqueletos de crustáceos, alas de insectos, paredes celulares de hongos y algas, entre otros. Sin embargo, la producción industrial de este biomaterial se basa en el tratamiento de conchas de diversos tipos de crustáceos como: camarones, langostas, cangrejos y krill.

El quitosano es un derivado de la quitina que se obtiene a partir de la desacetilación de la quitina, este método consiste en la eliminación de grupos acetilo, generalmente a través de tratamientos con hidróxidos a altas temperatura y la formación de grupos amino. El quitosano es un nanomaterial biodegradable y biocompatible, que se ha estudiado en aplicaciones para la industria del empaque.

Diversos estudios han revelado que la adición del quitosano en materiales de empaque y películas, mejora significativamente sus propiedades mecánicas y de barrera. Los estudios realizados a películas elaboradas a base de nanopartículas de quitosano, demostraron que existe una prolongación en el tiempo de vida útil de los alimentos, gracias a la mejora de las propiedades ópticas del nanocompuesto, como el brillo, color y resistencia a la luz UV, así como la barrera al vapor de agua, además, presentó un incremento en la elongación, la resistencia a la tracción y de ruptura [26].

## **NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS BASADOS EN CARBONATO DE CALCIO (CaCO<sub>3</sub>)**

El carbonato de calcio tiene diversas aplicaciones debido a su bajo costo, gran disponibilidad, sencibilidad en pH, lo que lo hace un candidato para su uso en la elaboración de compuestos poliméricos con aplicaciones en la industria alimentaria. Las nanopartículas de carbonato de calcio han generado un gran interés para el desarrollo de nanocompuestos, buscando mejorar propiedades específicas, requeridas en los materiales para empaques y películas. A partir de ello, se han reportado la elaboración de nanocompuestos con la incorporación de nanopartículas de CaCO<sub>3</sub>. Avella et al. [15], reportaron la elaboración de nanocompuestos de iPP/CaCO<sub>3</sub> empleando un promotor de adhesión interfacial, ya que, siendo el polipropileno isotáctico (iPP) uno de los plásticos más utilizados la industria del empaque, los autores buscaron mejorar el desempeño del iPP, donde se mostró un incremento en la propiedad de barrera a los gases del iPP.

Por otro lado, el PET presenta buenas propiedades de transparencia y barreras a gas, sin embargo, carece de características de barrera para el almacenamiento de productos sensibles al oxígeno, por lo que se ha explorado el desarrollo de compuestos especializado que no alteren el bajo costo de producción.

A partir de nanocompuestos a base de arcilla, se han logrado obtener las propiedades de barrera deseadas, sin embargo, el efecto nucleante que estos promueven, resultan en un deterioro de las propiedades ópticas del material [15]. Posteriormente se exploró el uso de nanocompuestos de PET/carbonato de calcio, donde se sugiere que las interacciones débiles entre PET y CaCO<sub>3</sub> ocasionan una aglomeración de las partículas, llevando a defectos estructurales que ocasionan el incremento del volumen libre y, por ende, mejoran la permeación de gases. Además, la buena dispersión de partículas, promueve una reducción en la permeabilidad a gases en la matriz polimérica [16].

## VENTAJAS DEL USO DE NANOCOMPUESTOS EN EMPAQUES DE ALIMENTOS

Actualmente existen una gran variedad de materiales utilizados en la industria de empaques de alimentos, como el papel, vidrio, aluminio, acero y plásticos. Si bien, los plásticos presentan características esenciales para la industria de empaques de alimentos, sin embargo, se requiere un largo tiempo antes de que comiencen a degradarse, lo que conlleva a la generación y acumulación de toneladas de desechos plásticos, que contribuyen en gran manera a la contaminación de suelos y mares. Por lo que el surgimiento de los nanocompuestos como alternativa al uso de los plásticos convencionales (“comodities”) en aplicaciones para la industria alimentaria, ha presentado importantes ventajas, entre las cuales destacan:

- Innovación: Refiriéndose al desarrollo de nuevos materiales con propiedades mejoradas.
- Mejor protección y conservación de los alimentos: Debido a que los nanomateriales incorporados mejoran las propiedades mecánicas, térmicas y de barrera del polímero puro.
- Mejora de comportamiento de biomateriales: Promueven la biodegradación en los polímeros que suelen degradarse en periodos largos de tiempo.

## CONCLUSIÓN

Los nanocompuestos poliméricos desempeñan un papel importante en la industria alimentaria, ya que han ofrecido soluciones eficaces y sostenibles en la elaboración de empaques. Además, la incorporación de la nanotecnología, ha abierto un nuevo panorama para optimizar los procesos de manufactura de productos en la industria alimentaria, mejorando la capacidad de los métodos tradicionales para la elaboración de empaques, envasado y películas para alimentos.

La adición de diversas nanopartículas para la elaboración de los nanocompuestos, ha permitido un rápido desarrollo e innovación de nuevos nanomateriales con propiedades mejoradas que pueden ofrecer soluciones rápidas a los problemas generados al medio ambiente, como consecuencia de la falta de interés en la correcta disposición de los desechos plásticos de un solo uso. Además, el mejor desempeño de los nanocompuestos, ha permitido mejorar la protección y conservación de los alimentos, contribuyendo a la sostenibilidad y reducción de costos para la manufactura de productos utilizados en alimentos.

## REFERENCIAS

1. C. Cáceres, M.J. Caracheo, (2017). Bioempaques: El Futuro de la Industria Alimentaria. Facultad de Ciencias Biológicas. Biotecnología. Universidad Autónoma de Puebla. México, 1-17.
2. . Melisa, J. Vega, A. Campos. (2011). Uso de Nanomateriales en Polímeros para la obtención de bioempaques en aplicaciones alimentarias. Revista de la Sociedad Química del Perú, 77, 4, 292-306.
3. R. Vizuete, I. López, A. Delgado Ramos, G. Sánchez (2020). Bioempaques para la industria alimentaria a partir de nanocompuestos y polímeros naturales. Alimentos Ciencia E Ingeniería, 27(2), 34–55.
4. F. Díaz, (2012). INTRODUCCIÓN A LOS NANOMATERIALES. recuperado de: [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m6/Introduccion%20a%20los%20nanomateriales.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/Introduccion%20a%20los%20nanomateriales.pdf) en 15/03/2024.
5. I. Ruiz. (2016). Nanotecnología en el embalaje de alimentos. Universidad del País Vasco. Tema 6, 2-56
6. J. Zavala (2008). Preparación de nanocompuestos magnéticos. Tesis de Especialización. Centro de Investigacion en Quimica Aplicada, 3-6.
7. A. Wechsler, Y. Briones, P. Dominguez, (2023). Nuevos recursos metodológicos para el desarrollo de materiales desde y para el diseño. Centros de estudios en diseño y comunicación, 73. <https://doi.org/10.18682/cdc.vi203.9755>
8. A.R. Ajitha, T. Sabu, Chapter 1 - Introduction: Polymer blends, thermodynamics, miscibility, phase separation, and compatibilization, Editor(s): Ajitha A.R., Sabu Thomas, Compatibilization of Polymer Blends, Elsevier, 2020, 1-29, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816006-0.00001-3>.
9. S. Thomas, Y. Grohens, and P. Jyotishkumar, Characterization of Polymer Blends: Miscibility, Morphology, and Interfaces, First Edition. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2015, 1-5
10. M.M. Coleman, J.F. Graf, P. Painter, et al. (1991). Specific Interactions and the Miscibility of Polymer Blends, Technomic, 20.
11. G.A. Ojeda, A.M. Arias Gorman, S.C. Sgroppo, (2019). La nanotecnología y su aplicación en alimentos. Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias Y Nanotecnología, 12(23), 1-14. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.23.67747>
12. D. Conchubhair, D. Fitzhenry, A. Lusher, A. King, T. van Emmerik, L. Lebreton, C. Ricaurte-Villota, L. Espinosa, E. O'Rourke, Joint effort among research infrastructures to quantify the impact of plastic debris in the ocean, Environmental Research Letters, 14: 065001-065001, 2019.
13. J.C. Posada, E. Montes-Florez, (2021). Revisión: materiales poliméricos biodegradables y su aplicación en diferentes sectores industriales. Informador Técnico, 86(1), 94–110. <https://doi.org/10.23850/22565035.3417>
14. J. Weiss, P. Takhistov, D.J. McClements, (2006), Functional Materials in Food Nanotechnology. Journal of Food Science, 71: R107-R116. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00195.x>

15. M. Avella, R. Avolio, E. Di Pace, M.E. Errico, G. Gentile, M.G. Volpe (2013). Polymer-Based Nanocomposites for Food Packaging Applications. In *Bio-Nanotechnology* (eds F. Shahidi, D. Bagchi, M. Bagchi, H. Moriyama and F. Shahidi). 212–226. doi:10.1002/9781118451915.ch11
16. K. Zeng, B. Yongping, (2005). Improve the Barrier Property of PET Film with Montmorillonite by in situ Interlayer Polymerization. *Materials Letters - MATER LETT.* 59. 3348-3351. 10.1016/j.matlet.2005.05.070.
17. S. Maisanaba, R. Guzmán-Guillén, M. Puerto, D. Gutiérrez-Praena, N. Ortuño, Jos Á. (2018). In vitro toxicity evaluation of new silane-modified clays and the migration extract from a derived polymer-clay nanocomposite intended to food packaging applications. *J Hazard Mater.* doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.08.003. Epub 2017 Aug 2. PMID: 28800565.
18. J. Hyungjoon, C. Yunkyu, C. Wooyoung, C. Eunji, K. Minsu, K.J. Yeon, K. Ohchan, J. Yunseong, W. Dae, K. Woo (2023). Selective gas permeation through polymer-hybridized graphene oxide nanoribbon nanochannels: Towards enhanced H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> selectivity, *Journal of Membrane Science*, Volume 683. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121856>.
19. K. Hanim, C. Wooyoung, E.S. Choi, K. Nomura, K. Jong-Won, J.C. Ellison, K. D. Woo (2024). Tailored self-assembly of semi-transparent polymer/clay nanocomposites for gas-barrier applications assisted by aqueous liquid crystalline scaffolds, *Progress in Organic Coatings*, Volume 186. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108003>.
20. P.A., Picouet, (2014). Influence of PA6 nanocomposites films on the stability of vacuum- aged beef loins during storage in modified atmosphere. *Meat Science*, Vol. 96, pp.574-580.
21. C. Ba, S. Park, S. Lim, S. Choi (2015). Improving flavonoid bioaccessibility using an edible oil-based lipid nanoparticle for oral delivery. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, Vol. 63, pp. 5266-5272.
22. R.M. Sharaby, E.A. Soliman, R. Khalil. (2024) Halochromic smart packaging film based on montmorillonite/polyvinyl alcohol-high amylose starch nanocomposite for monitoring chicken meat freshness, *International Journal of Biological Macromolecules*, Volume 258, Part 2.
23. I. Rezić, (2017). Food Packaging: Metal nanoparticles and carbon nanotubes-perfect antimicrobial nano-fillers in polymer-based food packaging materials., 497–532. doi:10.1016/B978-0-12-804302-8.00015-7
24. Y. Hou-Yong, Q. Zong-Yi, S. Bin, Y. Xiao-Gang, Y. Ju-Ming (2014). Reinforcement of transparent poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) by incorporation of functionalized carbon nanotubes as a novel bionanocomposite for food packaging, *Composites Science and Technology*, Volume 94. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.01.018>.
25. K. Attari, P. Molla-Abbasi, B. Rashidzadeh (2024). Fabrication of a packaging film based on PLA blends: The evolution of physical, mechanical, and rheological properties. *Polym Eng Sci.* 64(3): 1258-1273. doi:10.1002/pen.26612
26. I. Leceta, M. Peñalba, P. Arana, P. Guerrero, K. de la Caba (2015). Ageing of chitosan films: Effect of storage time on structure and optical, barrier and mechanical properties. *European Polymer Journal*, vol. 66, 170–179