

Influencia de la incorporación de nanopartículas de hexaferrita de estroncio sobre la topografía de una película de alcohol polivinílico

Influence of strontium hexaferrite nanoparticles incorporation on polyvinyl alcohol films topography

F.A. Duarte-Escorza ^a, B.N. López-Gutiérrez ^b, M. Villanueva-Ibáñez ^c,

G. Ortega-Zarzosa ^d, A. Lobo-Guerrero ^{e*}

^a Ingeniería de Materiales, Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Doctorado en Ciencia de los Materiales, Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^c Laboratorio de Nanotecnología, Sistemas Biológicos y Aplicaciones Industriales, Universidad Politécnica de Pachuca, Zempoala, Hidalgo, México.

^d Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 78000, San Luis Potosí, S.L.P., México.

^e Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

En este trabajo se desarrolló un material compuesto en forma de película polimérica utilizando alcohol polivinílico y nanopartículas magnéticas de hexaferrita de estroncio. Las nanopartículas se fabricaron por el método de sol-gel y el compuesto a base alcohol polivinílico se fabricó utilizando la técnica de spin-coating. Se estudió el efecto que tiene la dispersión de nanopartículas magnéticas sobre la topografía de las películas. El análisis de las muestras se realizó por medio de microscopía de fuerza atómica (AFM). Los resultados revelan que la adición de las nanopartículas afecta la topografía de la película polimérica, lo que sugiere la existencia de una fuerte interacción entre las nanopartículas y la matriz polimérica. La topografía de películas poliméricas tiene importantes aplicaciones en tecnologías de adsorción ya que es posible incrementar el área superficial sin aumentar las dimensiones de la película. En este caso, se demostró que es posible controlar la topografía de un compuesto magneto-polimérico a base de PVA mediante la adición de nanopartículas de hexaferrita de estroncio.

Palabras Clave: Material compuesto, recubrimiento por centrifugación, alcohol polivinílico, nanopartículas magnéticas, AFM.

Abstract

A polymeric film-based composite was developed in this work using polyvinyl alcohol (PVA) and strontium hexaferrite nanoparticles. The magnetic nanoparticles were synthesized by the Pechini method, and the PVA-based composite was fabricated using the spin-coating technique. The effect of magnetic nanoparticle dispersion on the topography of the films was investigated. Sample analysis was carried out using atomic force microscopy (AFM). Our findings demonstrate that the addition of nanoparticles alters the topography of the polymeric film, suggesting a strong interaction between the nanoparticles and the polymeric matrix. Therefore, we prove the feasibility to control the topography for a magnetic polymer film, based on strontium nanoparticles embedded in a PVA matrix

Keywords: Composite, Spin-coating, Polyvinyl alcohol, Magnetic nanoparticles, AFM.

1. Introducción

Los materiales compuestos de matriz polimérica con incorporación de nanopartículas han despertado un gran

interés debido a sus propiedades funcionales mejoradas y potenciales aplicaciones. Desde la aparición de los nanomateriales los materiales compuestos han sido objeto de amplios estudios (Bailey *et al.*, 2020). De hecho, se

*Autor para la correspondencia: azdrubal_guerrero@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: du413856@uaeh.edu.mx (F.A. Duarte Escorza), lo167968@uaeh.edu.mx (B.N. López Gutiérrez), villanueva@upp.edu.mx (M. Villanueva Ibáñez), gortega@fciencias.uaslp.mx (G. Ortega Zarzosa), azdrubal_guerrero@uaeh.edu.mx (A. Lobo Guerrero).

Historial del manuscrito: recibido el 29/04/2024, última versión-revisada recibida el 28/09/2024, aceptado el 30/10/2024, en línea (postprint) desde el 16/05/2025, publicado el 05/07/2025. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v13i25.12913>



consideran uno de los materiales claves para alcanzar un futuro sustentable (Huang *et al.*, 2017). El alcohol polivinílico (PVA) se ha convertido en uno de los polímeros más atractivos para los investigadores en, en cuanto al desarrollo de nuevos materiales compuestos se refiere, principalmente debido a sus destacadas propiedades fisicoquímicas (Kumar *et al.*, 2022). El alcohol polivinílico es un polímero sintético, transparente, con alta estabilidad química, es biocompatible y de fácil degradación. Sus propiedades físicas y químicas dependen en gran medida de su peso molecular, es decir, de la longitud de sus cadenas, del grado de hidrólisis, su tacticidad, cristalinidad y así como del empleo de aditivos capaces de modificar sus propiedades fisicoquímicas (Thong *et al.*, 2016, Nagara *et al.*, 2001).

El alcohol polivinílico consiste en moléculas largas formadas de pequeñas unidades de repetición (Miyasaka 2005). Para este polímero sintético existen en la actualidad una gran variedad de aplicaciones, desde su uso en la industria textil para la elaboración de fibras, en el desarrollo de filamentos para tecnología de impresión 3D, en la fabricación de adhesivos y lubricantes, en la conservación de alimentos, (Basa *et al.*, 2021, Tripathi *et al.*, 2009), etc. El alcohol polivinílico tiene además importantes aplicaciones como material adsorbente, ya que es capaz de remover ciertos colorantes que contaminan fuentes de agua (Mok *et al.*, 2020, Naim *et al.*, 2021), pero también tiene capacidad de adsorción de algunos otros elementos. Por ejemplo, el PVA ha mostrado tener una alta eficiencia en la remoción de iones de cobre (Chen *et al.*, 2011), de plomo (Shooto *et al.*, 2016), de litio (Zhao *et al.*, 2023), de arsénico (Murillo *et al.*, 2019), entre muchos otros (Razmgar *et al.*, 2021, Vatanpour *et al.*, 2023). Entonces, las propiedades del PVA hacen que sea un material multifuncional con gran potencial de aplicación en diferentes áreas de desarrollo tecnológico.

Por otro lado, es posible incrementar significativamente la capacidad de adsorción de películas y membranas fabricadas para aplicaciones adsorbentes por medio del control de sus características topográficas y a través de la generación de patrones superficiales que incrementan significativamente el área superficial. Además, el alcohol polivinílico puede ser biodegradado por determinados hongos o bacterias cuyas enzimas pueden descomponer las cadenas del alcohol polivinílico en dióxido de carbono, agua y biomasa microbiana, reduciendo significativamente su impacto medioambiental (Avcu *et al.*, 2022). Entonces, las propiedades físicas del alcohol polivinílico y su capacidad de ser biodegradado fácilmente bajo determinadas condiciones hacen que sea una opción interesante para el desarrollo de materiales compuestos con propiedades funcionales avanzadas.

Las ferritas hexagonales o hexaferritas son compuestos sintéticos desarrollados a principios de la década de los 50s en los laboratorios de la compañía Philips. Desde entonces, y hasta nuestros días, las hexaferritas han mostrado ser uno de los materiales que más han contribuido al desarrollo tecnológico de la humanidad, esto debido a sus favorables propiedades electrónicas y magnéticas, su alta estabilidad química, y bajo costo de fabricación (de Julián *et al.*, 2021). En particular, la hexaferrita de estroncio es un material cerámico con fórmula química $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, ampliamente utilizado como imán permanente (Pullar, 2012).

Además de las propiedades magnéticas de la hexaferrita de estroncio, utilizadas en la fabricación de imanes, motores y en la generación de energía eléctrica, este compuesto también ha demostrado tener aplicaciones en la industria biomédica, y recientemente ha sido utilizado eficientemente en la degradación fotocatalítica de colorantes textiles, así como en la adsorción de algunos contaminantes del agua (Srivastava *et al.*, 2012, Valenzuela, 2012, Murillo *et al.*, 2019).

El rápido desarrollo de la nanotecnología potencializó las aplicaciones de las hexaferritas debido a las propiedades surgidas en dicha escala nanométrica por este tipo de materiales cerámicos. Sin embargo, una desventaja que inhibe la aplicabilidad a gran escala de las nanopartículas es justamente su pequeño tamaño, lo que las hace difíciles de controlar y en muchos casos, las ventajas derivadas su tamaño nanométrico se pierden en un arreglo anisotrópico de nanopartículas (Martirosyan *et al.*, 2011, Reza Gordani *et al.*, 2014).

Una alternativa para el uso, aplicación y mejor aprovechamiento de las inigualables propiedades que exhiben las nanopartículas tiene que ver con su utilización en el desarrollo de materiales compuestos y materiales compuestos nanoestructurados. Un material compuesto surge a partir de la combinación de al menos dos materiales diferentes con el objetivo de mejorar alguna de sus propiedades funcionales (Hsissou *et al.*, 2021). Usualmente los materiales compuestos se conforman de una matriz que sirve de soporte, la cual típicamente es a base de polímeros, metales o cerámicos. También deben contener un material denominado relleno, que pueden ser fibras, láminas, partículas o nanopartículas.

Los materiales compuestos pueden ser fabricados de una variedad de formas, desde nanocompuestos, nanofibras, películas o materiales en bulto (Kakhramanov *et al.*, 2018). En este trabajo se estudiaron las características morfológicas y topográficas de un material compuesto formado por una matriz de alcohol polivinílico con incorporación de diferentes cantidades de nanopartículas de hexaferrita de estroncio. Mediante el análisis topográfico se estudió el incremento del área superficial de las películas como función del contenido de nanopartículas. El análisis de los resultados topográficos y morfológicos indican que el material compuesto se forma exitosamente, dando como resultado una fuerte interacción entre los componentes del compuesto.

1.1. Microscopía de Fuerza Atómica

La Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) permite obtener imágenes de alta resolución de una superficie mediante la interacción de una punta fina con la misma superficie, lo que aprovecha las fuerzas atómicas de atracción o repulsión entre ellas (Trache 2008 *et al.*, 2008). Esta técnica utiliza una punta microscópica montada en un voladizo flexible, que se acerca a la superficie de la muestra hasta que las fuerzas atómicas entre la punta y la superficie sean lo suficientemente fuertes como para provocar una deflexión del voladizo. La deflexión se mide con un láser y se utiliza para generar una imagen tridimensional de la superficie.

AFM puede ser utilizada para estudiar la estructura y propiedades de materiales a nivel atómico y tiene varios modos de operación, siendo el modo de contacto el más intuitivo. Como su nombre lo indica, la punta está en contacto

con la superficie de la muestra. Este modo opera en el régimen de fuerza repulsiva, aplicando una fuerza constante a la superficie.

Durante el proceso, la punta recorre la superficie mientras se mantiene la fuerza fija mediante un sistema de control de retroalimentación. Este sistema de control ajusta la altura de la punta en función de la deflexión del voladizo, asegurando que la fuerza aplicada a la superficie se mantenga constante. El modo de contacto ofrece una alta resolución y precisión, lo que lo convierte en una herramienta útil para el estudio de las características topografía de superficies a nivel atómico (Simpson et al., 1999). Sin embargo, este modo también puede ser susceptible a fuerzas de fricción y adhesión, lo que puede afectar la calidad de la imagen. Mediante el análisis por medio de AFM se pueden estudiar los cambios topográficos inducidos por la presencia de nanopartículas en una matriz polimérica. El estudio de películas poliméricas mediante AFM resulta conveniente ya que durante el escaneo de alta resolución no se daña la superficie de la película.

2. Experimental

El alcohol polivinílico se preparó mezclando de 10g de PVA (Sigma-Aldrich, PM 89000-98000) con 100 mL de agua desionizada. La mezcla se mantuvo en agitación constante a 60°C por 24 h. Posteriormente, la mezcla se sonico durante 2 horas, hasta obtener una solución transparente. Las nanopartículas magnéticas se obtuvieron por el método de sol-gel Pechini, utilizando como reactivos químicos nitrato de estroncio $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ (Meyer 99 %), nitrato de hierro $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Sigma Aldrich 98 %), ácido cítrico (Sigma Aldrich 99.5 %) y etilenglicol $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ (Sigma Aldrich 99.8 %).

Las sales se mezclaron en proporción estequiométrica de acuerdo con la fórmula química $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ de la hexaferrita de estroncio. Después, se añadió el ácido cítrico y el etilenglicol en una proporción de 4:1 en 20 mL de agua desionizada. La solución se calentó a 100°C para promover la reacción de poliesterificación. Las resinas obtenidas se sometieron a un nuevo tratamiento térmico a 380°C por 1 h. Los polvos se sometieron a un tratamiento térmico de sinterización a 1100°C por 4 horas para cristalizar la fase de hexaferrita.

Para fabricar las películas poliméricas se usaron 3 g del PVA preparado previamente y se añadió 0.25, 1.0, 5.0 y 10.0 % en peso de nanopartículas. Esas muestras fueron etiquetadas como PCF1, PCF2, PCF3 y PCF4, respectivamente. Las mezclas de PVA con nanopartículas se sometieron a un proceso de sonicación a 40 kHz y 80 °C durante 8 h, lo que permitió reducir el tamaño de las partículas hasta obtener nanopartículas y con ello obtener una mezcla viscosa y homogénea.

Las películas poliméricas se elaboraron añadiendo una alícuota de 300 μL a un sustrato de vidrio. La muestra se dispuso en un equipo de spin-coating WS-650MZ-23NPPB, configurando a una velocidad de rotación de 2000 rpm durante 20 segundos. Posteriormente, las películas formadas se dejaron secar a temperatura ambiente durante 48 horas.

La caracterización topográfica de las muestras se realizó usando un microscopio de Fuerza Atómica (AFM) FM-Nanoview 1000, usado en el modo de contacto. El análisis de las características topográficas, relieve y rugosidad

de las películas de alcohol polivinílico con nanopartículas de hexaferrita de estroncio, se realizó a través del procesamiento de las micrografías utilizando el programa WSxM 5.0 (Horcas et al., 2007). Las características morfológicas de las películas a base de alcohol polivinílico se obtuvieron utilizando un microscopio de barrido electrónico (SEM) Jeol JSM-6010LA. La caracterización estructural de las muestras se realizó utilizando un difractor de rayos X (Inel Equinox 2000) con fuente de cobalto y el tamaño de las nanopartículas se determinó utilizando un microscopio electrónico de transmisión Hitachi S-570.

3. Resultados

En la Figura 1 se presenta una micrografía TEM (microscopio electrónico de transmisión) donde se puede comprobar que el tamaño de partículas obtenida por el método de Pechini se encuentra entre 80 a 100 nm. Además, las partículas muestran una morfología de plaquetas hexagonales, que es característica de este tipo de compuestos. Además, las partículas se encuentran aglomeradas en pequeños cúmulos, los cuales son desaglomerados mediante un proceso de sonicación a bajas frecuencias, con lo que se logra obtener una mejor dispersión de las partículas en el polímero.

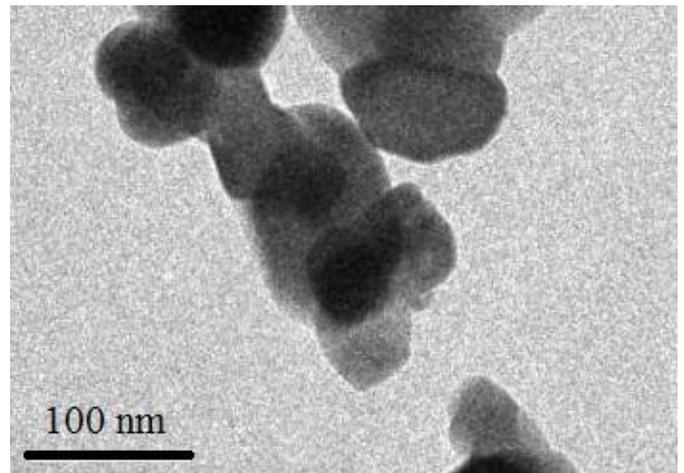


Figura 1. Micrografía TEM obtenida para la hexaferrita de estroncio fabricada por el método de Pechini en donde se observa que el tamaño de partículas se encuentra en el rango entre 80 y 100 nm.

Las micrografías de AFM de alta resolución se emplearon para analizar las superficies de películas de alcohol polivinílico y de un material compuesto a base de alcohol polivinílico con nanopartículas de hexaferrita de estroncio. El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto de las nanopartículas sobre la topografía del polímero. La Figura 2(a) muestra la película PCF1 sin nanopartículas. Esta película se caracterizó como referencia de las características topográficas del PVA sin nanopartículas, a partir de la cual se evaluaron los cambios debido a la adición de nanopartículas. En este caso se observa una película de superficie homogénea cuya topografía varía suavemente de una región elevada, mostrada en un tono claro, a una región a mayor profundidad que se visualiza por un tono oscuro en la micrografía.

En la Figura 2(b) se muestra el perfil topográfico, el cual consiste en un patrón ondular de máximos y mínimos bien definidos. Este patrón resulta de las fuerzas que actúan sobre la película durante su fabricación por spin-coating y depende en gran medida de la viscosidad del polímero tal como se ha reportado en trabajos anteriores (Nasalapure *et al.*, 2021).

El efecto de la adición de nanopartículas sobre las características topográficas de una película de PVA se observa en la micrografía AFM de la muestra PCF2, en la Figura 3(a). En este caso, la película presenta un aumento en la rugosidad debido a la presencia de 0.25 % en peso de nanopartículas de hexaferrita de estroncio. Aunque la cantidad de nanopartículas es relativamente pequeña, los efectos se extienden por toda la película. Lo que sugiere la existencia de un tipo de interacción entre las nanopartículas y el polímero que afecta de manera integral las propiedades de la matriz.

La Figura 3(b) muestra el perfil topográfico de la película PCF2 con incorporación de 0.25% en peso de nanopartículas de hexaferrita de estroncio. En este caso, la suavización del perfil ondular mostrado por la muestra PCF1 se debe a la formación de un patrón de picos sobre la superficie de la película. Estas características indican que las nanopartículas podrían controlar la manera en la que se forma la película.

La Figura 4(a) muestra la micrografía AFM de la película PCF3 fabricada con una matriz de alcohol polivinílico y 1 % en peso de nanopartículas de hexaferrita de estroncio. En este caso, la superficie adquiere una topografía ondulada. Este comportamiento se atribuye a una combinación de dos factores: i) la diferente densidad de las nanopartículas homogéneamente dispersas en la matriz polimérica y ii) una fuerte interacción a nivel molecular entre las nanopartículas y el polímero. Dichos factores dan como resultado un cambio en la topografía de la película al ser fabricada por el método de spin-coating.

La Figura 4(b) muestra el perfil topográfico de una sección de la micrografía de AFM. Este perfil muestra un patrón ondular similar al de la película de alcohol polivinílico sin nanopartículas, ver Figura 4(b), pero con el patrón de picos formados por la presencia de las nanopartículas mostrado en la Figura 3(b). Es decir, la película muestra una combinación de los dos casos previos, lo que refuerza la idea de que la topografía de la película se determina por la cantidad de nanopartículas embebidas en la matriz polimérica.

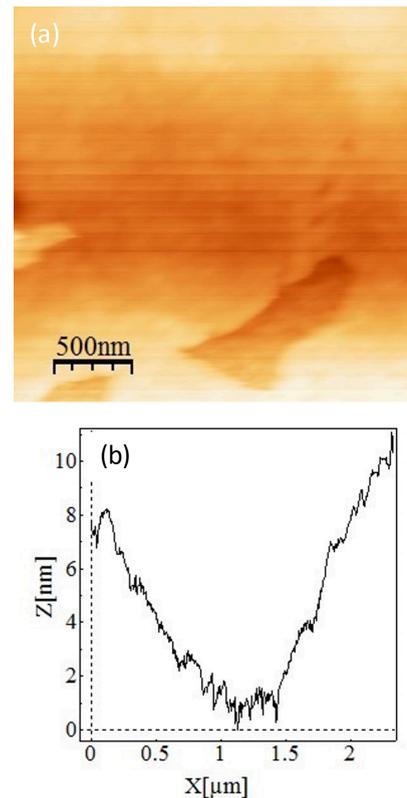


Figura 2. (a) Micrografía AFM de la película PCF1, sin nanopartículas magnéticas. (b) Perfil topográfico de la superficie obtenida por medio del programa WSxM 5.0.

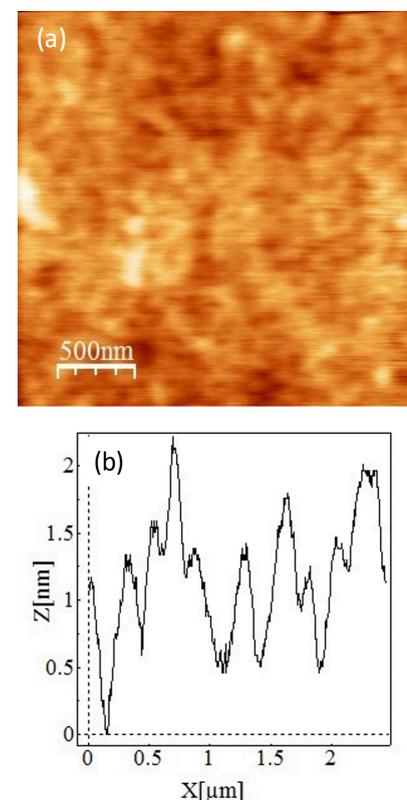


Figura 3. (a) Micrografía AFM de la película PCF2 con 0.25 % en peso de nanopartículas de hexaferrita de estroncio. (b) Perfil topográfico de la superficie de la película de PVA con nanopartículas de hexaferrita de estroncio.

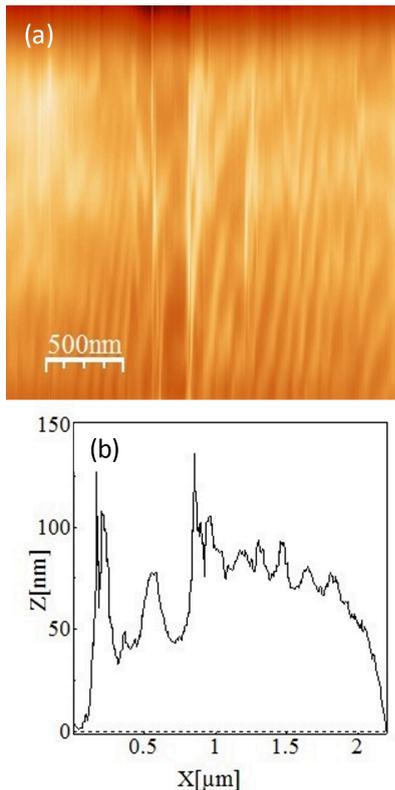


Figura 4. (a) Micrografía AFM de la muestra PCF3 consistente de una matriz de alcohol polivinílico con 1.0 % en peso de nanopartículas de hexaferrita de estroncio. (b) Perfil topográfico de la superficie de la película.

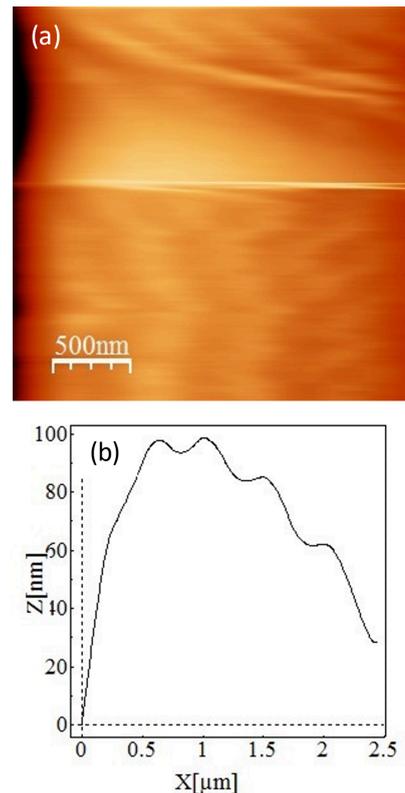


Figura 5. (a) Micrografía AFM de la muestra PCF4 fabricada a partir de una matriz de alcohol polivinílico con la adición de 10.0 % en peso de nanopartículas de hexaferrita de estroncio. (b) Perfil topográfico de la superficie (Ni la micrografía AFM ni el perfil de la superficie han sido suavizados numericamente).

La Figura 5(a) muestra la micrografía de AFM de la película PCF4, elaborada con una matriz de alcohol polivinílico y un elevado contenido de nanopartículas de hexaferrita de estroncio (10 % en peso). Aquí se observa que el alto contenido de nanopartículas atenúan los accidentes topográficos del polímero, preservando la estructura ondulatoria presente en la muestra PCF3.

La superficie suavizada del compuesto PCF4 podría tener el efecto de disminuir el área superficial con respecto a la superficie de la muestra PCF3. Sin embargo, en el caso de la muestra PCF4, se obtiene un aumento considerable de la altura de las crestas del patrón ondulatorio sin aumento de la fase. Por lo tanto, en la muestra PCF4 se obtiene un mejor control de las características topográficas, obteniendo superficies suavizadas, mismas que pueden tener aplicaciones en tecnologías de adsorción física de compuestos orgánicos e inorgánicos. Además, se demuestra la fuerte influencia que la adición de las nanopartículas magnéticas tiene sobre la conformación topográfica del polímero. La Figura 5(b) muestra el perfil topográfico de la muestra de alcohol polivinílico con 10 % en peso de nanopartículas de hexaferrita de estroncio. Con esta curva se demuestra el efecto de suavizado de la superficie que tiene el añadir un alto contenido de nanopartículas de hexaferrita de estroncio. Este suavizado se da tanto en el patrón ondulatorio de la película, como en las formaciones de picos.

La Figura 6 muestra las imágenes 3D obtenidas a partir del microscopio de fuerza atómica para las diferentes muestras analizadas. Se observa que la adición de nanopartículas al PVA modifica las características topográficas de la película en función del contenido de nanopartículas. El patrón de bordes ondulatorios formado en la superficie de las películas se conoce como *orange peel* (Lora et al., 1990), y se atribuye principalmente a las fuerzas que tienen lugar durante la formación de la película por el método el spin-coating. En este caso, tanto la viscosidad de polímero como las características morfológicas de las nanopartículas tienen un papel fundamental en la formación del patrón ondulatorio y es importante ya que permite aumentar el área superficial de las películas. Entonces, el control de la topografía tiene relevancia en aplicaciones de remediación medioambiental a través de un mecanismo de adsorción física. Teóricamente, el incremento del área superficial se traduce en una mayor capacidad de adsorción, al mismo tiempo que se evita aumentar las dimensiones de las películas.

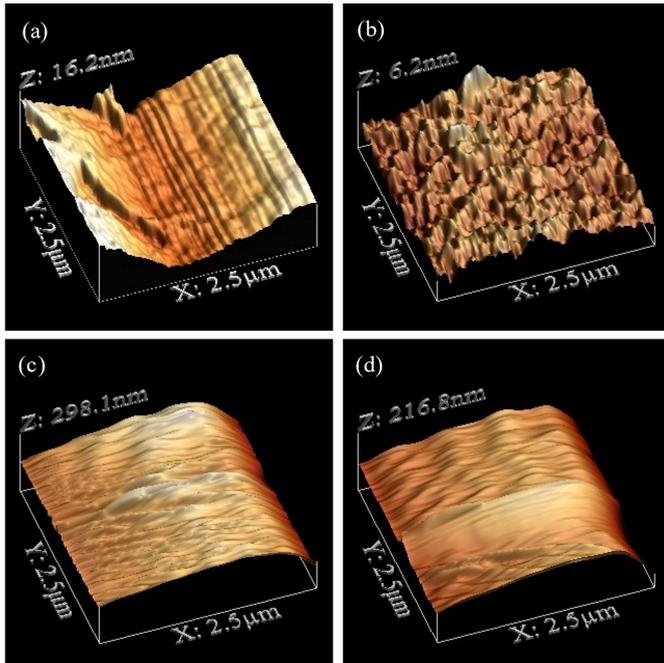


Figura 6. (a) Micrografías en AFM en 3D de las películas fabricadas por spin coating (a) PVA, y composites fabricados a partir de una matriz de PVA con (b) 0.25 %, (c) 1% y (d) 10% en peso de nanopartículas de hexaferrita de estroncio.

Por otro lado, la formación de picos y bandas que sobresalen al patrón ondulatorio es atribuido principalmente a la modificación de las propiedades estructurales del polímero, principalmente de la componente amorfa del alcohol polivinílico. Esto se debe a la fuerte interacción entre las unidades desordenadas del alcohol polivinílico y las nanopartículas magnéticas. La Figura 7 muestra el patrón de difracción de rayos X del PVA en comparación con el PVA con nanopartículas embebidas. Aquí, cuando se añaden las nanopartículas, se observa un corrimiento a la derecha acompañado de una disminución en la intensidad de la banda de difracción del PVA. Este comportamiento se debe a un cambio en las propiedades estructurales del PVA, mismas que son inducidas por la estrecha interacción del polímero con las nanopartículas.

La Figura 8 muestra las micrografías SEM obtenidas a partir de una película de alcohol polivinílico (PCF1), así como las películas del compuesto obtenido a partir de una matriz de alcohol polivinílico con incorporación de 0.25 % y 10 % en peso de nanopartículas de hexaferrita de estroncio, muestras PFC2 y PFC4, respectivamente. En este caso, se observa una evolución de las características morfológicas de la película polimérica al variar la cantidad de nanopartículas añadidas durante su fabricación.

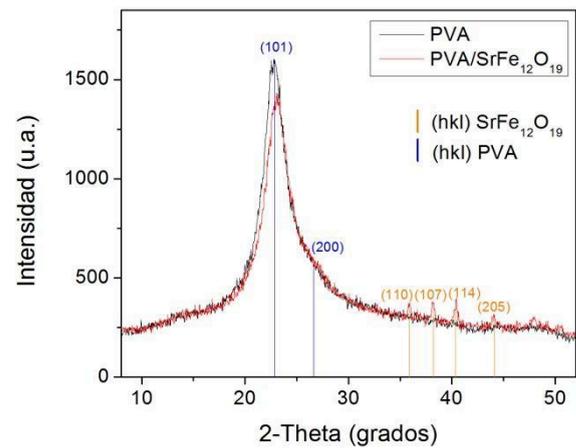


Figura 7. Patrón de difracción de rayos X obtenido para el PVA en comparación con una muestra de compuesto de PVA con incorporación de nanopartículas de hexaferrita de estroncio. (Se identifican los índices de Miller correspondientes al PVA y la hexaferrita de estroncio)

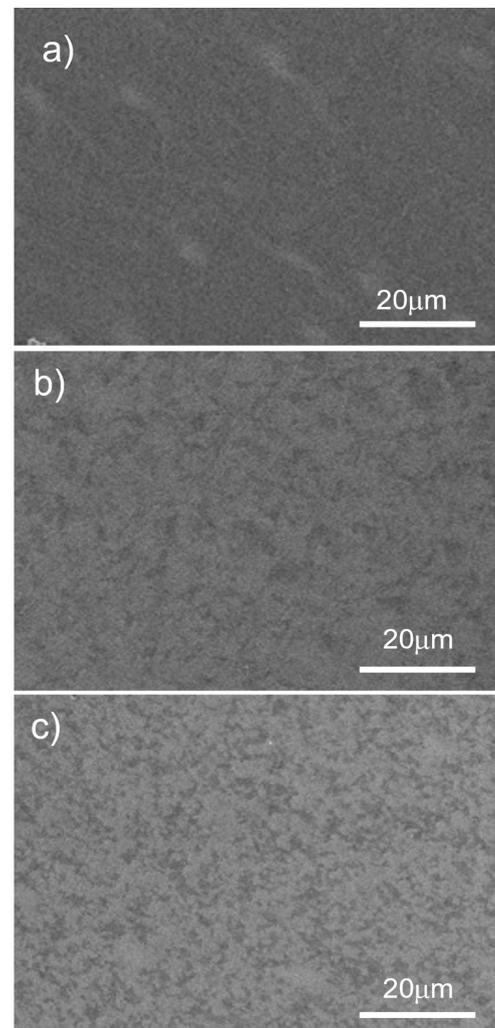


Figura 8. Micrografías SEM obtenidas para una película de (a) PCF1, fabricada sin la adición de nanopartículas, (b) PCF2, fabricada con la incorporación de 0.25 % en peso de nanopartículas de hexaferrita de estroncio y (c) PCF4 obtenida con 10 % en peso de nanopartículas magnéticas.

La película de alcohol polivinílico muestra una superficie uniforme, sin la aparición de imperfecciones como grietas o burbujas. Sin embargo, las películas formadas con la adición de nanopartículas muestran en la superficie un contraste a manera de islas, mismas que disminuyen al aumentar el contenido de nanopartículas. Dicho contraste no implica la ausencia de polímero en regiones del portamuestras. El contraste de las islas observadas es más bien atribuido a un cambio en las propiedades estructurales del polímero debido a la presencia de las nanopartículas magnéticas (López-Gutiérrez, et al., 2022). Probablemente, las nanopartículas mejoran el ordenamiento del polímero en el entorno cercano a las nanopartículas, en una región llamada zona interfacial (Rittigstein, et al., 2006). Cabe señalar que las nanopartículas deberían localizarse preferentemente en las regiones amorfas del polímero, ya que el alto ordenamiento de las regiones cristalinas hace imposible que las nanopartículas se localicen en dichas regiones.

4. Conclusiones

Se obtuvo un material compuesto en forma de película de matriz polimérica a base de alcohol polivinílico con la adición de diferentes cantidades de nanopartículas de hexaferrita de estroncio. La topografía y características morfológicas del compuesto mostraron una dependencia con la cantidad de nanopartículas añadidas. Además, la evolución topográfica del polímero sugiere que existe una fuerte interacción con las nanopartículas magnéticas. El comportamiento topográfico del compuesto, asociado con las propiedades de adsorción del alcohol polivinílico y la ventaja de contener nanopartículas magnéticas en su interior, hacen que este material compuesto sea una opción interesante en aplicaciones de remediación medioambiental, a través de la adsorción de diferentes iones metálicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Roel González (Universidad Politécnica de Pachuca) por la obtención de las micrografías AFM-SEM y a Evangelina Galván (Universidad Autónoma de San Luis Potosí) por su asistencia en laboratorio. Fernanda Argelia Duarte Escorza agradece a los profesores de Ingeniería de Materiales del AACTyM-UAEH.

Referencias

- Avcu, E., Bastan, F.E., Guney, M., Avcu, Y.Y., Rehman, M.A.U., Boccaccini, A.R., (2022). Biodegradable polymer matrix composites containing graphene-related materials for antibacterial applications: A critical review. *Acta Biomaterialia* 151, 1–44. [doi: 10.1016/j.actbio.2022.07.048](https://doi.org/10.1016/j.actbio.2022.07.048)
- Bailey, E.J., Winey, K.I., (2020). Dynamics of polymer segments, polymer chains, and nanoparticles in polymer nanocomposite melts: A review. *Progress in Polymer Science* 105, 101242. [doi: 10.1016/j.progpolymsci.2020.101242](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2020.101242)
- Basa, B., Jakab, G., Kállai-Szabó, N., Borbás, B., Fülöp, V., Balogh, E., Antal, I., (2021). Evaluation of biodegradable PVA-based 3D printed carriers during dissolution. *Materials* 14(6), 1350. [doi: 10.3390/ma14061350](https://doi.org/10.3390/ma14061350)
- Chen, J.H., Lin, H., Luo, Z.H., He, Y.S., Li, G.P., (2011). Cu (II)-imprinted porous film adsorbent Cu–PVA–SA has high uptake capacity for removal of Cu (II) ions from aqueous solution. *Desalination* 277, 265–273. [doi: 10.1016/j.desal.2011.04.040](https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.040)
- de Julian Fernandez, C., Sangregorio, C., de la Figuera, J., Belec, B., Makovec, D., Quesada, A., (2021). Progress and prospects of hard hexaferrites for permanent magnet applications. *Journal of Physics D: Applied Physics* 54, 153001. [doi: 10.1088/1361-6463/abd272](https://doi.org/10.1088/1361-6463/abd272)
- Gordani, G.R., Ghasemi, A., Saidi, A., (2014). Enhanced magnetic properties of substituted Sr-hexaferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation method. *Ceramics International* 40, 4945–4952. [doi: 10.1016/j.ceramint.2013.10.096](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.10.096)
- Horcas, I., Fernández, R., Gomez-Rodriguez, J.M., Colchero, J.W.S.X., Gómez-Herrero, J.W.S.X.M., Baro, A.M., (2007). WSXM: A software for scanning probe microscopy and a tool for nanotechnology. *Review of scientific instruments* 78(1) 013705. [doi: 10.1063/1.2432410](https://doi.org/10.1063/1.2432410)
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., Elharfi, A., (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite structures* 262, 113640. [doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113640](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640)
- Huang H., Dobryden I., Thorén P.-A., Ejenstam L., Pan J., Fielden M.L., Haviland D.B., Claesson P.M., (2017). Local surface mechanical properties of PDMS-silica nanocomposite probed with Intermodulation AFM. *Composites Science and Technology* 150, 111–119. [doi: 10.1016/j.compscitech.2017.07.013](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.07.013)
- Kakhramanov, N.T., Arzumanova, N.B., Alieva, F.M., Gadzhieva, R.S., (2018). Rheological characteristics of nano-composites based on vesuviane and ethylene-propylene block copolymer. *Plasticheskie massy* 11, 3–6. [doi: 10.35164/0554-2901-2018-11-12-3-6](https://doi.org/10.35164/0554-2901-2018-11-12-3-6)
- Kumar, A., Sood, A., Han, S.S., (2022). Poly (vinyl alcohol)-alginate as potential matrix for various applications: A focused review. *Carbohydrate polymers* 277, 118881. [doi: 10.1016/j.carbpol.2021.118881](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118881)
- López-Gutiérrez, B.N., Herrera-González, A.M., Aranda-Espinoza, S., Alemán-Ayala, K., Salazar-Muñoz E., Cabal-Velarde J.G., Castaneda-Robles I.E., Lobo-Guerrero A., (2022). Magnetic, structural, and fluorescence properties of Sr-hexaferrite nanoparticles embedded in a PV-OH film. *Physica B: Physics of Condensed Matter* 632, 413764. [doi: 10.1016/j.physb.2022.413764](https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.413764)
- Martirosyan, K.S., Galstyan, E., Hossain, S.M., Wang, Y.J., Litvinov, D., (2011). Barium hexaferrite nanoparticles: synthesis and magnetic properties. *Materials Science and Engineering: B* 176, 8–13. [doi: 10.1016/j.mseb.2010.08.005](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2010.08.005)
- Miyasaka, K., (2005). PVA-Iodine complexes: Formation, structure, and properties. In *Structure in polymers with special properties* 91–129. Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-56579-5_3
- Mok, C.F., Ching, Y.C., Muhamad, F., Abu Osman, N.A., Hai, N.D., Che Hassan, C.R., (2020). Adsorption of dyes using poly (vinyl alcohol)(PVA) and PVA-based polymer composite adsorbents: a review. *Journal of Polymers and the Environment* 28, 775–793. [doi: 10.1007/s10924-020-01656-4](https://doi.org/10.1007/s10924-020-01656-4)
- Murillo-Ortiz, R., Mirabal-Garcia, M., Cruz-Rivera, J.J., Valdez-Perez, D., Martinez, J.R., Perez-Moreno, F., (2019). Properties and arsenic removal evaluation of polyvinyl alcohol nanofibers with embedded strontium hexaferrite nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics* 234, 151–157. [doi: 10.1016/j.matchemphys.2019.05.043](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.043)
- Nagara, Y., Nakano, T., Okamoto, Y., Gotoh, Y., Nagura, M., (2001). Properties of highly syndiotactic poly (vinyl alcohol). *Polymer* 42, 9679–9686. [doi: 10.1016/S0032-3861\(01\)00493-1](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00493-1)
- Al Naim, A. F., El-Shamy, A.G., (2021). A new reusable adsorbent of polyvinyl alcohol/magnesium peroxide (PVA/MgO₂) for highly selective adsorption and dye removal. *Materials Chemistry and Physics* 270, 124820. [doi: 10.1016/j.matchemphys.2021.124820](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124820)
- Nasalapure, A.V., Chalannavar, R.K., Kasai, D.R., Reddy, K.R., Raghu, A.V., (2021). Novel polymeric hydrogel composites: Synthesis, physicochemical, mechanical and biocompatible properties. *Nano Express* 2, 030003. [doi: 10.1088/2632-959X/ac11bf](https://doi.org/10.1088/2632-959X/ac11bf)
- Pullar, R.C., (2012). Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics. *Progress in Materials Science*, 57, 1191–1334. [doi: 10.1016/j.pmatsci.2012.04.001](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.04.001)
- Razmgar, K., Nasirae, M., (2022). Polyvinyl alcohol-based membranes for filtration of aqueous solutions: A comprehensive review. *Polymer Engineering & Science* 62, 25–43. [doi: 10.1002/pen.25846](https://doi.org/10.1002/pen.25846)
- Rittigstein, P., Torkelson, J.M., (2006). Polymer–nanoparticle interfacial interactions in polymer nanocomposites: confinement effects on glass transition temperature and suppression of physical aging. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* 44, 2935–2943. [doi: 10.1002/polb.20925](https://doi.org/10.1002/polb.20925)
- Spangler, L.L., Torkelson, J. M., Royal, J.S., (1990). Influence of solvent and molecular weight on thickness and surface topography of spin-coated

- polymer films. *Polymer Engineering & Science* 30(11), 644–653. doi: [10.1002/pen.760301104](https://doi.org/10.1002/pen.760301104)
- Shoote, N.D., Dikio, C.W., Wankasi, D., Sikhwivhilu, L.M., Mtunzi, F.M., Dikio, E.D., (2016). Novel PVA/MOF nanofibres: fabrication, evaluation and adsorption of lead ions from aqueous solution. *Nanoscale research letters* 11, 1–13. doi: [10.1186/s11671-016-1631-2](https://doi.org/10.1186/s11671-016-1631-2)
- Simpson, G.J., Sedin, D.L., Rowlen, K.L., (1999). Surface roughness by contact versus tapping mode atomic force microscopy. *Langmuir* 15, 1429–1434. doi: [10.1021/la981024a](https://doi.org/10.1021/la981024a)
- Srivastava, R., Yadav, B.C., (2012). Ferrite materials: introduction, synthesis techniques, and applications as sensors. *International Journal of Green Nanotechnology*, 4, 141–154. doi: [10.1080/19430892.2012.676918](https://doi.org/10.1080/19430892.2012.676918)
- Thong, C.C., Teo, D.C.L., Ng, C.K., (2016). Application of polyvinyl alcohol (PVA) in cement-based composite materials: A review of its engineering properties and microstructure behavior. *Construction and Building Materials* 107, 172–180. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2015.12.188](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.188)
- Trache, A., Meininger, G.A., (2008). Atomic force microscopy (AFM). *Current protocols in microbiology* 8, 2C-2. doi: [10.1002/9780471729259.mc02c02s8](https://doi.org/10.1002/9780471729259.mc02c02s8)
- Tripathi, S., Mehrotra, G.K., Dutta, P.K., (2009). Physicochemical and bioactivity of cross-linked chitosan–PVA film for food packaging applications. *International journal of biological macromolecules*, 45, 372–376. doi: [10.1016/j.ijbiomac.2009.07.006](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2009.07.006)
- Valenzuela, R., (2012). Novel applications of ferrites. *Physics Research International* 2012, 1–9. doi: [10.1155/2012/591839](https://doi.org/10.1155/2012/591839)
- Vatanpour, V., Teber, O.O., Mehrabi, M., Koyuncu, I., (2023). Polyvinyl alcohol-based separation membranes: A comprehensive review on fabrication techniques, applications and future prospective. *Materials Today Chemistry* 28, 101381. doi: [10.1016/j.mtchem.2023.101381](https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2023.101381)
- Zhao, M., Zhao, C., Zhang, Y., Luan, J., Pan, G., Han, C., Liu, Y., (2023). One-pot granulation of cross-linked PVA/LMO for efficient lithium recovery from gas field brine. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11, 110859. doi: [10.1016/j.jece.2023.110859](https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110859)