

Análisis de membranas poliméricas compuestas por Microscopía de Fuerza Atómica

Atomic Force Microscopy analysis of polymeric composite membranes

LUISA PIROSHKA TERRAZAS-BANDALA¹, GUILLERMO GONZÁLEZ-SÁNCHEZ²,
GUADALUPE VIRGINIA NEVÁREZ-MOORILLÓN³, MARÍA DE LOURDES BALLINAS-CASARRUBIAS^{3,*}

Recibido: Abril 30, 2007

Aceptado: Agosto 31, 2007

Resumen

Entre los métodos más novedosos para la caracterización superficial de materiales sólidos se encuentra el microscopio de fuerza atómica, el cual permite obtener datos de rugosidad, porosidad y formación de nódulos en superficie. En el presente trabajo se prepararon membranas de triacetato de celulosa y nanopartículas de carbón activado por medio de evaporación de solvente en diferentes condiciones fisicoquímicas. Se utilizó el microscopio de fuerza atómica en su modalidad de "tapping" para la obtención de imágenes de altura y fase de la superficie de las membranas con el fin de estudiar la nanodispersión de las partículas en la matriz polimérica. En general las membranas más homogéneas se obtuvieron a bajas temperaturas (35 °C) y mayor humedad (70 % HR).

Palabras clave: Membranas, microscopía de fuerza atómica, carbón activado.

Abstract

Atomic Force Microscopy is a novel method for solid surface characterization. With this technique it is possible to obtain data such as roughness, porosity and nodules formation on the surface of materials. In this work, triacetate cellulose and activated carbon nanoparticles composite membranes were cast by solvent evaporation on different physicochemical conditions. Tapping mode in AFM was used to obtain images from height and phase contrast, to evaluate particle nanodispersion on the polymeric matrix. Generally, more homogeneous membranes were obtained at low temperature (35 °C) and high relative humidity (70 % RH).

Keywords: Membranes, atomic force microscopy, activated carbon.

¹ Estudiante de doctorado del Centro de Investigación en Materiales Avanzados de Chihuahua (CIMAV).

² Investigador asociado del Centro de Investigación en Materiales Avanzados de Chihuahua (CIMAV).

³ Profesores de la Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Circuito Universitario S/N, Chihuahua, Chih. México. Teléfono (614) 414-4492.

* Dirección electrónica del autor de correspondencia: mballinas@uach.mx.

Introducción

En el estado del arte de la nanotecnología se encuentra el desarrollo de nanoestructuras disponibles en macrosuperficies para crear materiales que combinen funcionalidad, alta selectividad y estabilidad; cuyas propiedades difieran apreciablemente de las del material en el bulto. A este tipo de materiales se les considera bajo el término de nanocompuestos (Esteves, 2005; Kear, 1998; Min, 2003). Las características de los materiales en bulto pueden verse dramáticamente modificadas al incluir dentro de su estructura nanopartículas. Éstas afectan propiedades tales como la rigidez del material, propiedades de adsorción, propiedades eléctricas, de conductividad, de quimisorción, etc. (Schmidt, 2003).

Uno de los aspectos más importantes en la obtención de membranas nanocompuestas es contar con los métodos de análisis que permitan elucidar sus características estructurales. Entre los métodos más novedosos que se utilizan para dilucidar la estructura superficial de las membranas se encuentra la microscopía de fuerza atómica (AFM por sus siglas en inglés).

El microscopio de fuerza atómica (AFM) desarrollado por Binnig y colaboradores permite la obtención de imágenes de muestras no conductoras hasta escalas nanométricas (Binnig, 1986). La mayor ventaja del AFM sobre el microscopio electrónico de transmisión es que no se requiere de tratamiento previo para la preparación de muestras (Park, 2004). De las imágenes superficiales obtenidas por AFM, en el modo de altura (Z), se pueden obtener varios parámetros morfológicos, incluyendo la rugosidad y la desviación estándar de los valores de esta coordenada. Existen a la fecha varios estudios efectuados con el AFM que relacionan propiedades de permeabilidad y estructura interna de las membranas con los resultados de rugosidad, tamaño de poro, tamaño y distribución de nódulos y morfología general del material (Khulbe

1997; 2000; 2004; Khayet, 2004; Singh, 1998).

En particular, existen estudios en los que se ha determinado la influencia de diferentes condiciones de preparación de membranas asimétricas de acetato de celulosa y de butirato-acetato de celulosa, utilizadas en procesos de nanofiltración y ósmosis inversa, en la rugosidad del material (Stamatialis, 1999). Para las membranas de acetato de celulosa con menor rugosidad, la retención aumentó y los flujos disminuyeron al incrementar los tiempos de evaporación. Otros estudios superficiales realizados en películas de poli (etilen-tereftalato) (PET) por AFM han mostrado que se puede distinguir entre las regiones cristalinas y amorfas del material. También se ha sugerido que las irregularidades de la superficie pueden afectar las propiedades fisicoquímicas de la película (Gould, 1997; Elimelch, 1997; Hamza, 1997).

Las imágenes de contraste de fase son una poderosa extensión del modo de contacto intermitente (*tapping*, en inglés) en el AFM, ya que proveen de información a escala nanométrica sobre estructuras de la superficie y propiedades regularmente no reveladas por otras técnicas microscópicas.

En esta técnica se registra el retraso de la fase de oscilación del cantilever en el modo intermitente. Las imágenes obtenidas, además de evidenciar la topografía, detectan, según los parámetros y la punta que se utilice, variaciones en la composición, adhesión, fricción, visco-elasticidad y otras variables. De esta manera es posible obtener mapas de diferentes componentes en materiales compuestos y diferenciar regiones de alta y baja adhesión o dureza superficial.

En este trabajo se prepararon membranas compuestas de triacetato de celulosa (TC) y nanopartículas de carbón activado, a ser utilizadas en procesos de filtración en diferentes condiciones de temperatura y humedad. Se obtuvieron imágenes de superficie y de fase por AFM con el fin de evidenciar la nanodispersión de las partículas en el material y corroborar su homogeneidad. Los datos obtenidos por esta técnica complementan la información necesaria para el uso del material en operaciones membranales de gran escala.

Materiales y métodos

Se obtuvieron nanopartículas de carbón activado (Carbochem) por medio de solvatación química (Ballinas, 2004), y se adicionaron como relleno a una matriz polimérica de TC (Sigma-Aldrich). Se prepararon membranas compuestas por medio de evaporación de solvente (cloruro de metileno, Sigma Aldrich) a diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa (35-55° C, 10-70% HR) en una cámara controlada (Shellab) para tres cargas de las partículas (CC: 0, 1, 3% p/p) (Ballinas, 2006).

El análisis en AFM se realizó utilizando un microscopio de fuerza atómica Nanoscope IV de Digital Instruments® (San-

ta Bárbara, CA). Las muestras se montaron en un disco de acero inoxidable con cinta adhesiva y se colocaron en un portamuestras.

Se obtuvieron imágenes en el modo de tapping utilizando puntas suaves de fósforo recubiertas de sílice modelo RTESP (Veeco®), las cuales tienen un rango de frecuencia de oscilación óptima entre 276 y 316 KHz. Se utilizaron velocidades de barrido en el intervalo de 2-3 Hz. Los parámetros, especialmente la altura de partida, la amplitud y la retroalimentación se ajustaron para obtener la mejor resolución. Para cada muestra se tomaron imágenes en diferentes puntos para obtener datos confiables y reproducibles. Se tomaron las señales de salida correspondientes a la altura y al contraste de fases. Los análisis de rugosidad de las imágenes se realizaron con el software Nanoscope 5.30r3sr3®.

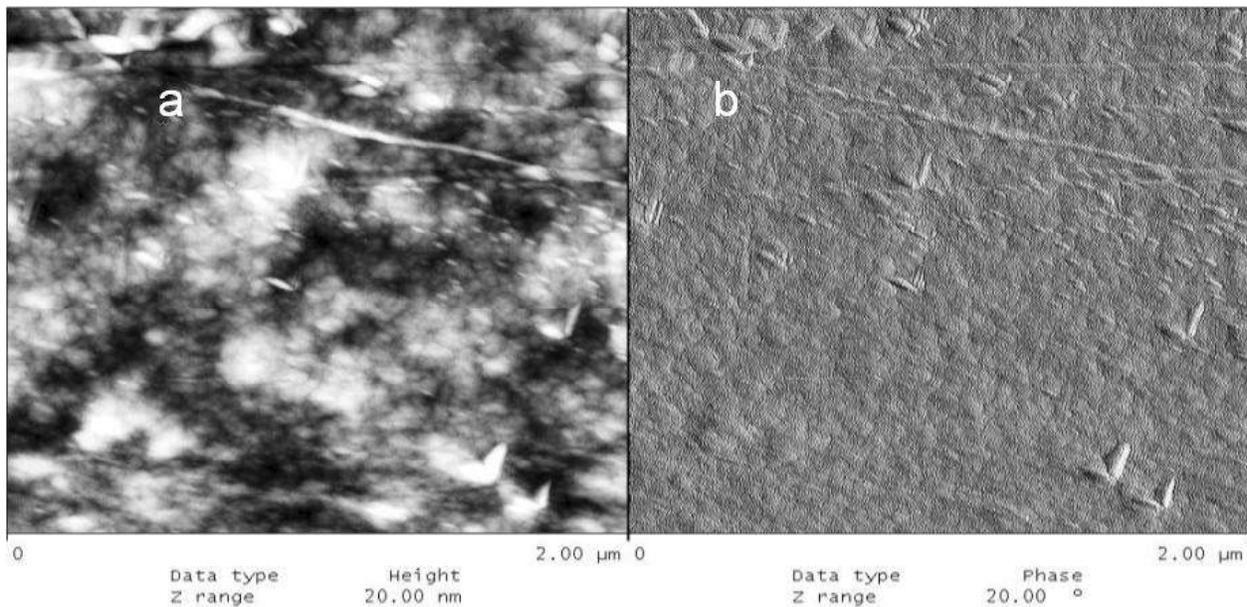
Resultados y discusión

La resolución que se puede alcanzar utilizando el microscopio de fuerza atómica depende tanto del equipo utilizado como de la muestra que será analizada. En cuanto al equipo, el alcance de la resolución está determinado principalmente por el rango de voltaje del escáner y por las dimensiones de la punta que se utilice en la medición.

La rugosidad de la muestra limita la velocidad del barrido y ésta a su vez restringe el área del análisis (Khulbe, 2000). Existen otros factores externos que pueden limitar la resolución del equipo, como el ruido ambiental y las vibraciones del suelo. Considerando estos parámetros se lograron realizar barridos de las membranas del orden de 2 μm^2 .

Para las membranas de triacetato de

Figura 1. Imágenes por AFM de la membrana: T= 55 °C, 10% Hr y 0% CC.



(a) Imagen de altura, escala en Z = 20.00 nm.
(b) Imagen de contraste de fase, escala en Z = 20.00°.

celulosa sin carga de carbón se realizaron mediciones en áreas tomadas al azar. Las figuras 1 y 2 muestran las imágenes de altura y contraste de fase de las membranas preparadas a 55 °C, 10% HR, 0% CC y 35 °C, 70% HR, 0% CC respectivamente.

En la figuras 1(a) y 2(a), en las imágenes de altura se observan cúmulos de hasta 20 nm de altura, que sobresalen de la superficie de las membranas. Sin embargo, en las imágenes de contraste de fase [figuras 1(b) y 2(b)] no se observan diferencias en el ángulo de difracción, lo que indica que los cúmulos observados en las imágenes de altura corresponden a nódulos formados por el mismo material polimérico.

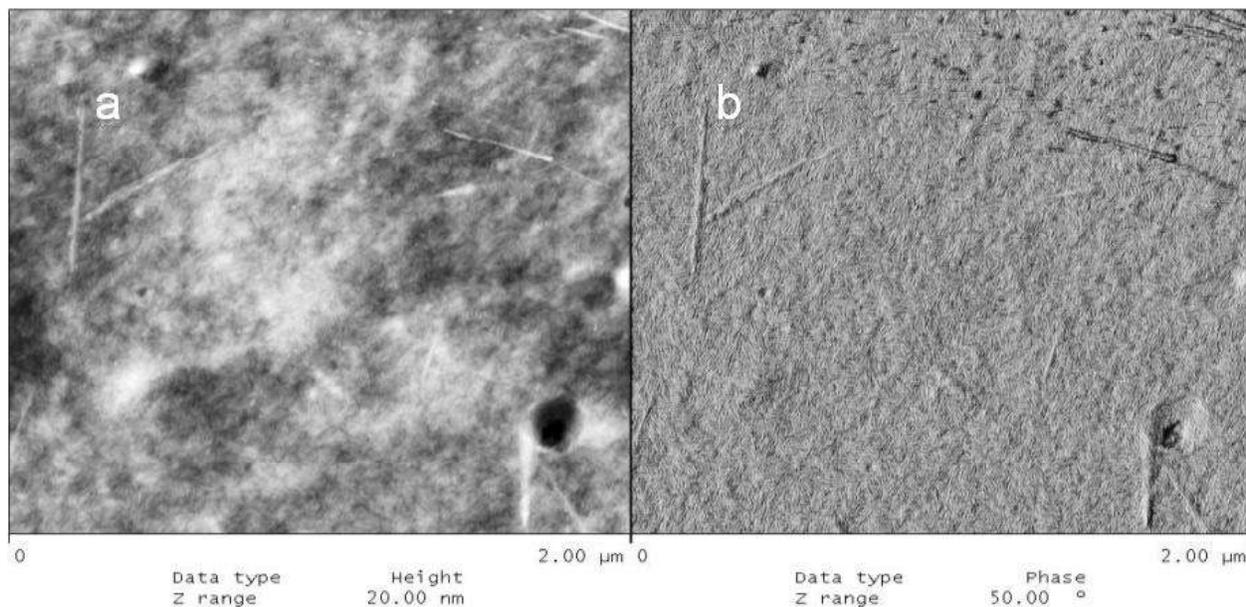
El contraste de fase en AFM tiene especial utilidad para el análisis de muestras que presentan contraste en pequeñas escalas, tales como mezclas de materiales blandos y duros. En un estudio del efecto

de un compatibilizador en nanocompuestos de acetato de celulosa y arcillas orgánicas (Park 2004), las imágenes de contraste de fase muestran claramente la diferencia entre los dos materiales. Adicionalmente a algunas pruebas mecánicas, se reporta la relación entre la nanodispersión de las arcillas y la carga del compatibilizador.

Las imágenes de altura se analizaron con el software Nanoscope 5.30r3sr3 para obtener parámetros de rugosidad. Los valores obtenidos nos brindan información adicional sobre la superficie de las membranas. Tomando en consideración que el área de análisis es extremadamente pequeña con respecto al total, se realizaron numerosos barridos en la superficie de la membrana.

En el Cuadro 1 se muestran los valores de desviación estándar media en el eje Z (Rms) y los valores de desviación estándar

Figura 2. Imágenes por AFM de la membrana: T=35 °C, 70% Hr y 0% CC.



(a) Imagen de altura, escala en Z = 20.00 nm.

(b) Imagen de contraste de fase, escala en Z = 50.00°.

dar máxima (rmax) para las membranas de triacetato de celulosa sin carga de carbón. En estas membranas se observa un efecto por la interacción de temperatura y humedad. En general las membranas más homogéneas (valores menores de Rms y rmax) se obtuvieron a menores temperaturas y mayor humedad. Esto concuerda con los análisis realizados en las imágenes obtenidas por SEM (Ballinas, 2006) y con los resultados de ángulo de contacto.

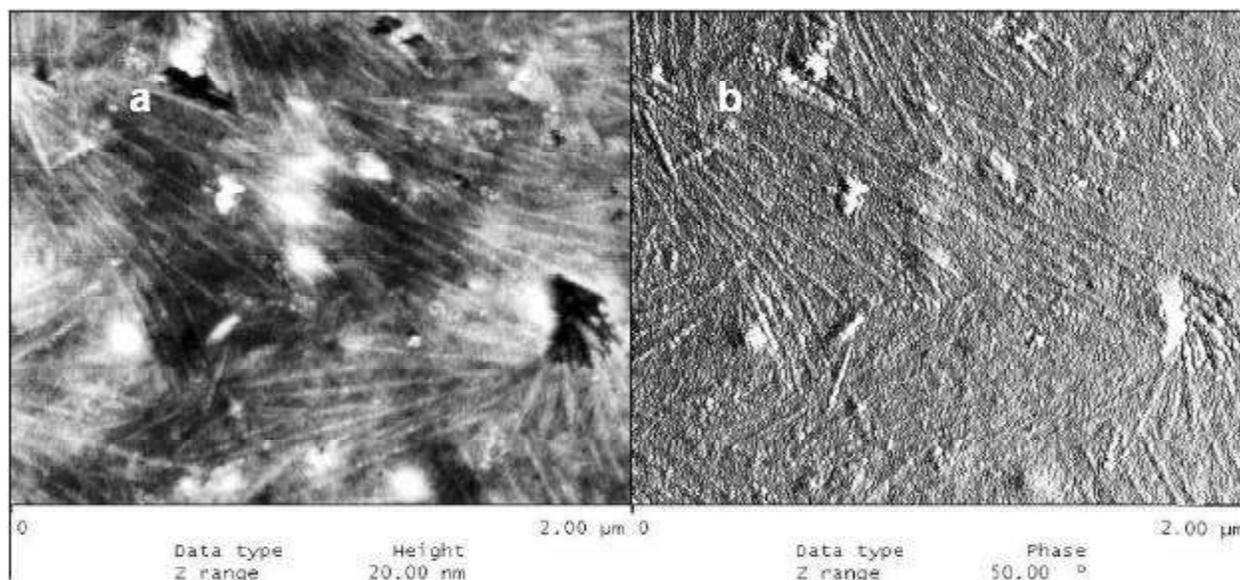
Cuadro 1. Valores nanométricos de Rms y rmax, obtenidos de imágenes de altura por AFM de las membranas sin carga de carbón.

	10% Hr	40% Hr	70% Hr
35°C	Rms - 1.519	Rms - 1.418	Rms - 1.395
	rmax - 20.619	rmax - 20.028	rmax - 29.801
45°C	Rms - 1.349	Rms - 1.180	Rms - 1.493
	rmax - 22.995	rmax - 14.752	rmax - 14.177
55°C	Rms - 2.236	Rms - 2.462	Rms - 1.551
	rmax - 22.798	rmax - 27.592	rmax - 25.767

Para las membranas compuestas preparadas con 1 % de carga de carbón las imágenes se obtuvieron específicamente en las áreas donde no se observaron acumulaciones de carbón mayores de 100 nm (observado con el microscopio óptico acoplado al AFM).

Los valores de Rms y rmax (Cuadro 2), para estas membranas no presentan diferencias significativas entre sí, sin embargo son consistentemente mayores a los obtenidos en las membranas sin carbón. La obtención de imágenes de las membranas con 1 % de CC presentó grandes dificultades, ya que constantemente se perdía contacto entre la superficie de la muestra y la punta, debido a la rugosidad causada por los cúmulos de carbón. Por esta misma razón no fue posible obtener imágenes de las membranas preparadas con 3 % de CC.

Figura 3. Imágenes por AFM de la membrana: T=35 °C, 70% Hr y 1% CC.



(a) Imagen de altura, escala en Z = 20.00 nm.

(b) Imagen de contraste de fase, escala en Z = 50.00°.

Cuadro 2. Valores nanométricos de Rms y rmax, obtenidos de imágenes de altura porAFM de las membranas con 1 % de carga de carbón.

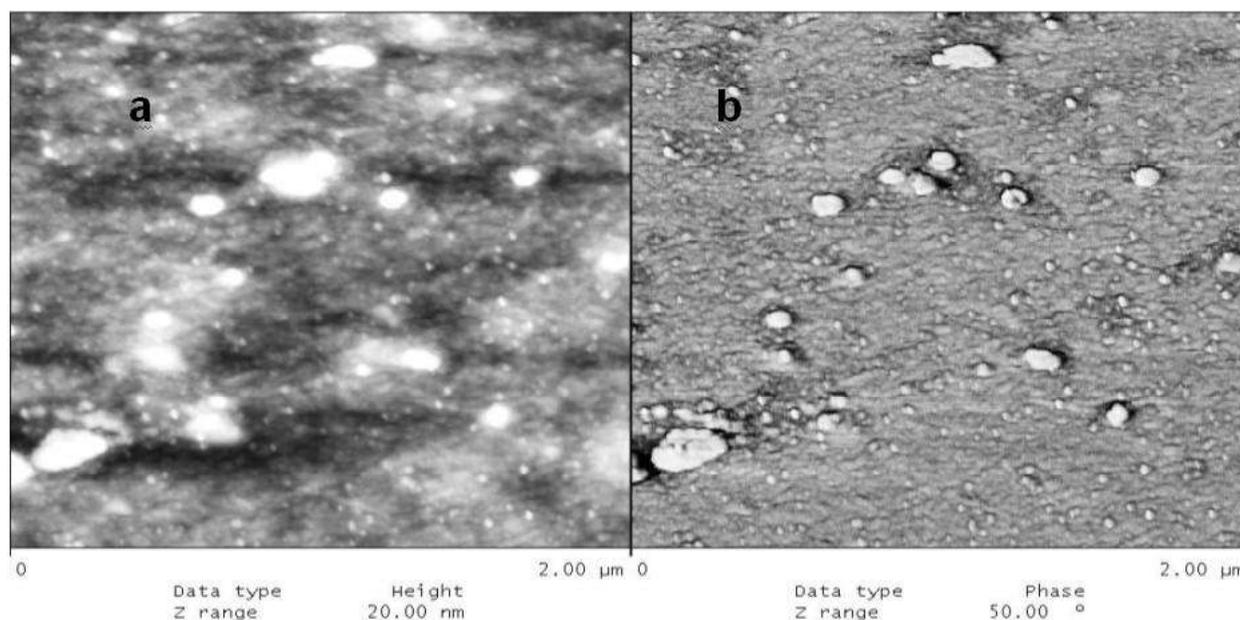
	10% Hr	40% Hr	70% Hr
35°C	Rms - 1.662 rmax - 31.426	Rms - 2.337 rmax - 31.432	Rms - 2.151 rmax - 36.648
45°C	Rms - NR rmax -	Rms - 1.662 rmax - 25.854	Rms - 1.418 rmax - 12.330
55°C	Rms - 2.856 rmax - 39.007	Rms - NR rmax -	Rms NR rmax -
NR - No registrado.			

De todas las membranas analizadas, la que se preparó a 35°C, 70% HR y 1% de CC fue la única que presentó patrones de rugosidad, fácilmente observados en las imágenes de altura [Figura 3(a)] los cuales no se observan en la membrana obtenida sin carga de carbón [Figura 2(a)]. Esto puede ser resultado de un acomodo de moléculas más ordenado derivado de un mayor tiempo de evaporación y de la interacción de las partículas de carbón en el proceso de moldeado.

La Figura 4 muestra imágenes de AFM obtenidas de una membrana preparada con 1 % de carga de carbón a 35 °C y 40% Hr. En estas imágenes se observan cúmulos que sobresalen en la imagen de altura [Figura 4(a)], y en la imagen de contraste de fase [Figura 4(b)] se observan claras diferencias en el ángulo de difracción, lo que indica una diferencia de material. Esto permite suponer que los cúmulos que sobresalen son nanopartículas de carbón dispersas sobre el material polimérico.

Es importante señalar que las partículas de carbón del orden nanométrico que se observan en AFM no fueron distinguibles en las micrografías del microscopio de transmisión electrónica (TEM). El análisis de las imágenes por SEM de las membranas (Ballinas, 2006) permitió estimar un tamaño promedio de partícula de 1.6 µm, por lo que se efectuarán pruebas adicionales de distribución de tamaño de partí-

Figura 4. Imágenes por AFM de la membrana: T= 35 °C, 40% Hr y 1% CC.



(a) Imagen de altura, escala en Z = 20.00 nm.

(b) Imagen de contraste de fase, escala en Z = 50.00°.

culas por Difracción Láser (Master Sizer MS2000, Malvern Instruments®), utilizando distintos solventes en la medición.

Conclusiones

Se obtuvieron imágenes de alta resolución en el AFM, tanto de altura como de fase, de las membranas de triacetato de celulosa producidas con 0 y 1 % de carga de carbón. Estas imágenes muestran el grado de nanodispersión alcanzado por las partículas de carbón en la matriz polimérica según las condiciones fisicoquímicas en que se obtuvieron las membranas. Los valores de desviación estándar máxima para el eje Z (rmax) se encuentran en el rango de 12 a 39 nm, lo cual indica homogeneidad en la superficie de las membranas.

La caracterización de la superficie se podrá relacionar con otros datos obtenidos

en pruebas termogravimétricas, mecánicas y de permeabilidad de las mismas membranas. 

Literatura citada

- BALLINAS, L., C. Torras, V. Fierro, R. García-Valls. 2004. Factors influencing activated carbon polymeric composite membrane structure and performance. *J of Physics and Chemistry of solids* 65:633–637.
- BALLINAS, L., Terrazas-Bandala, R. Ibarra-Gomez, M. Mendoza-Duarte, L. Manjarrez- Nevárez, G. Gonzalez-Sanchez. 2006. Structural and performance variation of activated carbon-polymer films. *Polymers for Adv. Tech.* 17:11-12, 991-999.
- BINNIG G, C. F. Quate and Ch. Gerber. 1986. Atomic force microscope. *Phys Rev Lett.* 12:930.
- ELIMELECH, M., X. Zhu, A. E. Childress and S. Hong. 1997. Role of membrane surface morphology in colloidal fouling of cellulose acetate and composite aromatic polyamide reverse osmosis membranes. *J Membrane Sci.* 127:101-109.
- ESTEVEZ, A. C., A. M. Barros-Timmons, J. A. Martins, W. Zhang, J. Cruz-Pinto and T. Trindade. 2006. Crystallization behaviour of new poly (tetra methyleneterephthalamide) nanocomposites containing SiO₂ fillers with distinct morphologies. *Composites: Part B.* 36:51–59.
- GOULD, S. A. C., D. A. Schiraldi, and M. L. Occellil. 1997. Analysis of poly(ethylene terephthalate) (PET) films by atomic force microscopy. *J Appl. Polymer Sci.* 65 (7):1237-1243.

- HAMZA, A., G. Chowdhury, T. Matsuura and S. Sourirajan. 1997. Sulphonated poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide)-polyethersulphone composite membranes. Effects of composition of solvent system, used for preparing casting solution, on membrane- surface structure and reverse-osmosis performance. *J Membrane Sci.* 129:55-64.
- KHAYET, M., K.C. Khulbe, and T. Matsuura. 2004. Characterization of membranes for membrane distillation by atomic force microscopy and estimation of their water vapor transfer coefficients in vacuum membrane distillation process. *J Membrane Sci.* 238:199-211.
- KEAR, B. 1998. Nanostructured bulk materials: Synthesis, processing, properties and performance, In R&D Status and Trends. Siegel (eds.) USA.
- KHULBE, K. C., and T. Matsuura. 2000. Characterization of synthetic membranes by Raman spectroscopy, electron spin resonance, and atomic force microscopy; a review. *Polymer* 41:1917-1935.
- KHULBE, K.C., T. Matsuura, G. Lamarche and H. J. Kim. 1997. The morphology characterization and performance of dense PPO membranes for gas separation. *J Membrane Sci.* 135:211-223.
- KHULBE, K.C., F. Hamad, C. Feng, T. Matsuura and M. Khayet. 2004. Study of the surface of the water treated cellulose acetate membrane by atomic force microscopy. *Desalination* 161(3):259-262.
- MIN, J. S., Kiyozumi, Y., and Itoh, N. 2003. Sealant-free preparation technique for high-temperature use of a composite zeolite membrane. *Ind. Eng. Chem. Res.* 42 (1):80-84.
- PARK, H. M., Liang, X; Mohanty, A. K., Misra, M. and Drzal, L. T. 2004. Effect of compatibilizer on nanostructure of biodegradable cellulose acetate/ organoclay nanocomposites. *Macromolecules* 37(24):9076-9082.
- SCHMIDT, G. and M. M. Malwitz. 2003. Properties of polymer-nanoparticle composites. *Current Opinion in Colloid and Interface Science* 8 (1):103-108.
- SINGH, S., K. C. Khulbe, T. Matsuura and P. Ramamurthy. 1998. Membrane characterization by solute transport and atomic force microscopy. *J Membrane Sci.* 142:111-127.
- STAMATIALIS, D.F., C. R. Dias, and M. N. Pinho. 1999. Atomic force microscopy of dense and asymmetric cellulose-based membranes. *J Membrane Sci.* 160:235-242.

Este artículo es citado así:

- TERRAZAS-BANDALA, L. P., G. González-Sánchez, G. V. Nevárez-Moorillón y M. L. Ballinas-Casarrubias. 2007. Análisis de membranas poliméricas compuestas por Microscopía de Fuerza Atómica. *TECNOCIENCIA Chihuahua* 1(2): 18-26.

Resúmenes curriculares de autor y coautores

LUISA PIROSHKA TERRAZAS BANDALA. En el año 2001 recibió el título de Ingeniero Químico opción Alimentos por la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), siendo distinguida con una Mención Honorífica por ocupar el Primer Lugar de la XLV Generación gracias a su alto promedio escolar. En abril del 2004 recibió el grado de Maestría en Ciencias, con especialidad en Ciencia y Tecnología de Alimentos, grado que le fue otorgado por la Facultad de Ciencias Químicas (UACH); la brillante defensa de su tesis titulada "Detección del Gen de la Enterotoxina A de *Staphylococcus aureus* en Quesos Tipo Chihuahua por PCR" le fue reconocida con una Mención Honorífica. Actualmente cursa el tercer año del programa de Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, A. C. (CIMAV), con sede en la ciudad de Chihuahua. La M. C. Terrazas se encuentra desarrollando el trabajo de Investigación "Síntesis e implementación de membranas compuestas de tri-acetato de celulosa y partículas de carbón activado para la remoción de arsénico en agua". Como parte de su programa doctoral realiza una estancia de investigación en el Laboratorio MADIREL de la Universidad de Provence, en la ciudad de Marsella, Francia. Durante su etapa de estudiante ocupó el cargo de Consejero Universitario Alumno (Facultad de Ciencias Químicas de la UACH), periodo 1999-2000; además, en el periodo 1999-2000 fue Consejero Técnico Alumno por el área de Ingeniería de la misma Facultad. Actualmente es Miembro Estudiante del International Water Association (IWA), de la Asociación de Tecnólogos en Alimentos México (ATAM) y del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos (IMIQU). Ha participado como ponente en siete congresos nacionales e internacionales y publicado cinco artículos en revistas arbitradas.

GUILLERMO GONZÁLEZ SÁNCHEZ. En el año de 1996 egresó de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), otorgándosele el título de Ingeniero Químico. Fue profesor asistente becado del Departamento de Ingeniería Química de la Universitat Rovira I. Virgili, cuya sede se encuentra en Tarragona, España, otorgándosele en 2001 el diploma de Estudios Avanzados, y en el año 2004 recibió el grado de Doctor en Ingeniería Química y de Procesos. Su área de especialización fue el diseño de reactores, para estudiar la cinética de termohidrólisis de compuestos aromáticos en agua supercrítica. Fue Supervisor de Producción en la industria farmacéutica, cargo que ejerció por espacio de tres años. Actualmente ocupa un cargo de Investigador Asociado en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV) de la ciudad de Chihuahua, México. Durante los últimos años ha adquirido una vasta experiencia en técnicas de caracterización para materiales poliméricos compuestos, así como en el campo de la investigación en las áreas de membranas de nanofiltración, reactores biológicos con membrana y modificación de carbón activado para remediación de agua contaminada. Por su larga experiencia y productividad científica ha sido distinguido por el Sistema Nacional de Investigadores (S.N.I.) del CONACYT como Candidato a Investigador.

MARÍA DE LOURDES BALLINAS CASARRUBIAS. Durante el periodo 1991-1995 realizó sus estudios de licenciatura en la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), obteniendo en 1996 el título de Ingeniero Químico. En septiembre 1998 recibió el grado de Maestría en Ciencias especialidad Química Analítica, por la Facultad de Química de la UNAM; por su alto desempeño académico recibió la presea "Alfonso Caso" como la alumna más distinguida de la generación. En el periodo 1998-2002 realizó su programa doctoral, obteniendo en 2003 el grado de Doctor en Ciencias con especialidad en Química Analítica por la Facultad de Química de la UNAM. A lo largo de su carrera como investigadora se ha dedicado al desarrollo de métodos de separación para compuestos tóxicos. Actualmente es profesora de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), donde ocupa también el cargo de Secretaria de Investigación y Posgrado. La productividad de la Dra. Ballinas es abundante, ya que incluye, entre otras cosas, la presentación de 40 ponencias en congresos científicos nacionales e internacionales; ha publicado 10 artículos en revistas arbitradas e indexadas y cuatro capítulos de libros; además posee una patente industrial. El Sistema Nacional de Investigadores del CONACYT le ha reconocido su trayectoria científica otorgándole el nombramiento de Investigador Nacional Nivel I.

GUADALUPE VIRGINIA NEVÁREZ MOORILLÓN. Cursó su licenciatura en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), recibiendo en 1987 el título de Químico Biólogo Parasitólogo con la defensa de su tesis "Actividades biológicas de derivados del Ácido Araquidónico". Realizó estudios de doctorado en la University of North Texas conduciendo una investigación sobre el tema "Biodegradación de componentes de petróleo contaminantes en aguas y suelos por bacterias del suelo"; en agosto de 1995 se le otorgó el grado de Doctor en Ciencias, especialidad Biología. Ha recibido más de siete distinciones y premios, siendo el más reciente el Premio Nacional en Ciencia y Tecnología de Alimentos en la Categoría Profesional; este premio le fue otorgado en 2006 por la Industria Mexicana de Coca-Cola y CONACYT, promotores del citado concurso. Por su destacada labor científica, ha sido reconocida como Investigador Nacional Nivel I por el Sistema Nacional de Investigadores del CONACYT. Desde 1995 ha sido maestra de la Facultad de Ciencias Químicas (UACH) y su productividad científica incluye catorce artículos en revistas arbitradas; ha editado más de cuatro libros y dirigido más de 65 tesis (licenciatura y maestría). La Dra. Nevárez pertenece a diversas sociedades científicas, citándose entre algunas de ellas la American Society for Microbiology, la Society for Microbial Ecology y la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería.