



Fotocatálisis heterogénea como herramienta tecnológica para la purificación de aguas residuales

A. MARTÍNEZ DE LA CRUZ*, S. A. OBREGÓN ALFARO*, E. M. LÓPEZ CUÉLLAR*, KAREN H. LOZANO RODRÍGUEZ*



La mayor dificultad en el tratamiento de efluentes industriales acuosos estriba en la ineficiencia de la aplicación de procesos físicos, como coagulación y adsorción, dado que sólo transfieren los contaminantes del agua residual a otro medio y provocan una polución secundaria. Estos mecanismos, además de resultar imprácticos, requieren etapas adicionales para la recuperación de los residuos y una posterior calcinación de los mismos, con un consecuente aumento en los costos del proceso.

La presente investigación pretende atacar un punto esencial para el desarrollo de la humanidad: el tratamiento de aguas residuales para preservar una alta calidad del medio ambiente. Hasta hace poco, bastaba que este proceso de purificación fuera viable técnicamente, aplicable a gran escala y, en gran medida, económico. Sin embargo, en tiempos modernos debemos incorporar la sustentabilidad del mismo a cualquier propuesta que pretenda atacar esta problemática. En este

sentido, la fotocatalisis heterogénea cumple con todos estos requisitos para ser considerada como una tecnología de vanguardia, acorde a los tiempos actuales. La sustentabilidad de la fotocatalisis heterogénea se basa en el empleo de óxidos semiconductores cerámicos (no tóxicos) y energía solar (energía gratuita).

La fotocatalisis heterogénea es un proceso que consiste en utilizar un sólido semiconductor (normalmente de banda ancha), capaz de absorber directa o indirectamente energía radiante, igual o superior a su banda de energía prohibida. La etapa inicial del proceso consiste en la generación de pares hueco-electrón en las partículas del semiconductor por una promoción de sus electrones de la banda de valencia a la de conducción. La formación del par hueco-electrón y la migración de estas especies a la superficie del fotocatalizador permite que se lleven a cabo reacciones de óxido-reducción en la superficie del fotocatalizador, en la que participan especies contaminantes adsorbidas.

La fotocatalisis heterogénea presenta grandes ventajas sobre los métodos tradicionales de tratamiento de aguas residuales, puesto que incluye la mineralización completa de contaminantes y una

□ El presente artículo está basado en la investigación "Fotocatálisis heterogénea como herramienta tecnológica para la purificación de aguas residuales", galardonada con el Premio de Investigación UANL 2010 en la categoría de Ingeniería y Tecnología, otorgado en sesión solemne del Consejo Universitario, en septiembre de 2010.

* Posgrado de Materiales, FIME-UANL. Pedro de Alba s/n, San Nicolás de los Garza, N.L., México

alta eficiencia de degradación de casi todos los compuestos orgánicos, convirtiéndola en una de las tecnologías más prometedoras para la remoción de contaminantes orgánicos en medios acuosos. Semiconductores como TiO_2 , ZnO , ZnS , WO_3 , entre otros, son los fotocatalizadores más estudiados. Entre éstos, el TiO_2 es el semiconductor de mayor aplicación, debido a su alta estabilidad y bajo costo.¹

Desde el punto de vista tecnológico, la fotocatalisis heterogénea se encuentra actualmente en una fase temprana de investigación y desarrollo tecnológico. No obstante, existen dispositivos comerciales que operando bajo este principio se utilizan para la purificación de aire, principalmente en la eliminación de óxidos de nitrógeno (NO_x) y de compuestos orgánicos volátiles (VOC's).²

Asimismo, el desarrollo comercial de superficies autolimpiantes como ventanas y piezas cerámicas, así como de cubiertas de focos de alumbrado que operan por la presencia de un fotocatalizador es una realidad.³ Aunque son notables los reportes de avances en el empleo de la fotocatalisis heterogénea para la remoción de contaminantes en medio acuoso,⁴ el camino a recorrer aún es largo para su aplicación en grado masivo y en el empleo de radiación solar para la activación del proceso.

El presente trabajo busca contribuir al desarrollo del conocimiento científico del área y, más allá de experimentos modelo de laboratorio, dar un paso hacia la aplicación tecnológica en película delgada. Para esto hemos propuesto los molibdatos $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$, y $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ como fotocatalizadores activos al visible, para la degradación de colorantes orgánicos utilizados en industrias como la textil, de cosméticos, de alimentos y fármacos.⁵

En términos generales, la parte medular del trabajo se puede dividir en tres: una exploratoria para identificar la existencia de actividad fotocatalítica en los óxidos propuestos, una segunda en la que se utilizan rutas alternas de síntesis de los óxidos,

con la finalidad de potenciar su actividad fotocatalítica, y una tercera en la que se encamina el trabajo hacia una aplicación tecnológica, mediante la deposición del fotocatalizador en forma de película delgada.

Experimental

Los molibdatos $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ y $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ se prepararon en forma policristalina mediante el método cerámico tradicional, y por coprecipitación en medio acuoso de sales metálicas de bismuto y molibdeno.

Para la preparación de los molibdatos por el método cerámico tradicional se pesaron cantidades en relación estequiométrica apropiada de los óxidos Bi_2O_3 y MoO_3 , se homogeneizaron y se hicieron reaccionar a 550°C durante 96 horas para el caso de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$, y a 700°C por 24 horas para la preparación de $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$.

Para la síntesis de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ y $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ por coprecipitación, se utilizaron como precursores los reactivos $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. A partir de dichas sales se prepararon las soluciones correspondientes, y se siguió el procedimiento experimental descrito a detalle en un trabajo previo.⁶

El óxido $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ fue seleccionado para estudiar su actividad fotocatalítica en película delgada. La película delgada de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ se obtuvo por evaporación térmica al vacío. Para este propósito, polvos policristalinos de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ sintetizados por el método cerámico tradicional se utilizaron como fuente de evaporación. La evaporación térmica de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ se realizó en un sistema de evaporación térmica (TES) Åmod 204, desarrollado por la compañía Angstrom Engineering. El óxido $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ se colocó en un crisol metálico, que a su vez se conectó en un circuito eléctrico del TES, como se muestra en la figura 1.

La presión dentro de la cámara se disminuyó hasta 2×10^{-6} Torr. Con la finalidad de evitar una abrupta evaporación del óxido, se utilizó una lenta velocidad de depósito del orden de 1.2 \AA s^{-1} .

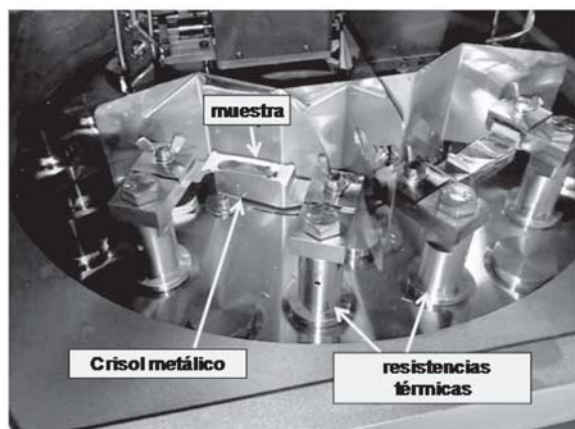


Fig. 1. Parte interna de la cámara del sistema de evaporación térmica para la formación de película delgada de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$.

El proceso de formación de los molibdatos policristalinos de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ y $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, así como sus características estructurales, morfológicas, propiedades ópticas y texturales, se estudiaron mediante difracción de rayos-X (DRX), microscopía electrónica de transmisión y barrido (TEM/SEM), espectroscopía de reflectancia difusa (DRS) e isothermas de adsorción-desorción de N_2 (área BET). Como modelo de reacción fotocatalítica se utilizó la degradación del colorante orgánico rodamina B (rhB) en medio acuoso.

Resultados y discusiones

Las muestras obtenidas por el método de coprecipitación se caracterizaron estructuralmente mediante difracción de rayos-X en polvo. Los difractogramas obtenidos mostraron la presencia de las fases $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ y $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ sin ninguna impureza, de acuerdo a las tarjetas JCPDS 084-0787 y 021-0103, respectivamente. En particular, la temperatura óptima de síntesis de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ se ubicó en 450°C , mientras que en el caso de $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ fue posible la obtención del óxido en el intervalo de temperatura de 250 a 480°C .

La morfología de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ se observó mediante TEM y SEM (figura 2). De acuerdo al análisis por TEM, la muestra no presentó una morfo-

logía definida en particular, y se observaron partículas de formas irregulares y de tamaños superiores a los 300 nm . Este fenómeno es común en materiales preparados por coprecipitación, dado que esta técnica dificulta una formación controlada del material.

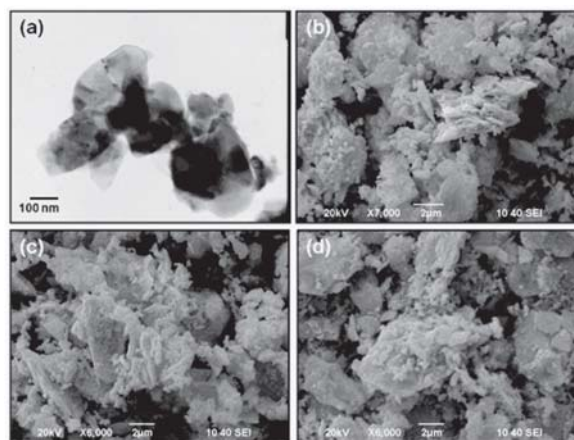


Fig. 2. Morfología de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ preparada mediante coprecipitación: (a) TEM; (b-d) SEM.

La caracterización morfológica de las distintas muestras de $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, calcinadas en el intervalo de temperatura de 250 - 480°C , se llevó a cabo mediante TEM. Cuando el precursor producto de la coprecipitación se calcinó a 250°C , la fase $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ obtenida presentó una morfología homogénea de nanoplatos rectangulares, cuyas dimensiones fueron de 50 nm de ancho y 200 nm de largo, tal como observa en los incisos (a-b) de la figura 3. A temperaturas mayores de calcinación, como 300°C , la morfología de las partículas comenzó a cambiar, obteniéndose formas semiesféricas; sin embargo, con el predominio de los platos rectangulares anteriormente descritos (incisos c-d).

La presencia de dichas partículas semiesféricas se mantuvo cuando la muestra se calcinó a 400°C (inciso e), no se observó la presencia de los platos rectangulares. Cuando la muestra se calcinó a 480°C , se observó un cambio significativo en la morfología, y aparecieron partículas elipsoides, producto del proceso natural de sinterización del

óxido cerámico. Asimismo, se encontraron partículas aisladas con tamaños que oscilan entre 500 a 700 nm, que indican la existencia de un paso crítico de sinterización entre 400-480°C.

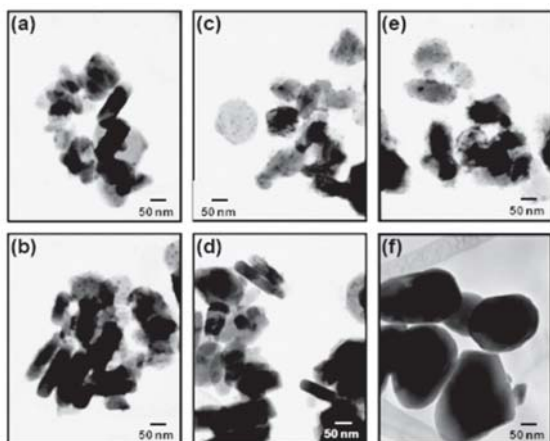


Fig. 3. Morfología de $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ preparada mediante coprecipitación y calcinada a (a-b) 250°C; (c-d) 300°C; (e) 400°C; (f) 480°C.

De acuerdo a los espectros de reflectancia difusa (DRS) obtenidos, la muestra de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ preparada por coprecipitación presentó un ligero desplazamiento hacia el azul, con respecto a la muestra del método cerámico tradicional, calculándose valores de E_g de 2.44 eV para el material obtenido por coprecipitación, y de 2.51 eV para la muestra obtenida por el método cerámico tradicional.

Con respecto a las distintas muestras obtenidas de $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, todas presentaron un marcado desplazamiento hacia longitudes de onda más cortas con respecto al material de referencia (700°C). Dicho fenómeno, al igual que en el caso de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$, puede asociarse a pequeñas cantidades de material amorfo presente en el óxido sintetizado, como se ha descrito para otros sistemas.⁷ Del análisis de los datos obtenidos se estimaron valores de E_g de 2.74 eV (250°C), 2.82 eV (300°C), 2.79 eV (400°C), 2.77 eV (480°C) y de 2.45 eV para la muestra de referencia. Todos estos valores, al encontrarse por debajo de los 3 eV,

indican la capacidad de los óxidos para absorber en la región visible del espectro electromagnético.

El área superficial de las muestras preparadas por coprecipitación se determinó mediante el método BET, con los valores de la isoterma de adsorción-desorción de N_2 a su temperatura de ebullición (tabla I).

Los valores obtenidos del área superficial entran dentro de los valores típicos reportados para óxidos de metales de transición sintetizados por coprecipitación.

Tabla I. Valores de área superficial BET para muestras de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ y $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$.

Molibdato	Método de síntesis	Temperatura de calcinación (°C)	Área superficial, BET ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)
$\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$	Estado sólido	550	0.38
$\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$	Coprecipitación	450	2.28
$\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$	Estado sólido	700	0.67
$\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$	Coprecipitación	250	7.04
$\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$	Coprecipitación	300	6.92
$\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$	Coprecipitación	400	7.08
$\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$	Coprecipitación	480	2.56

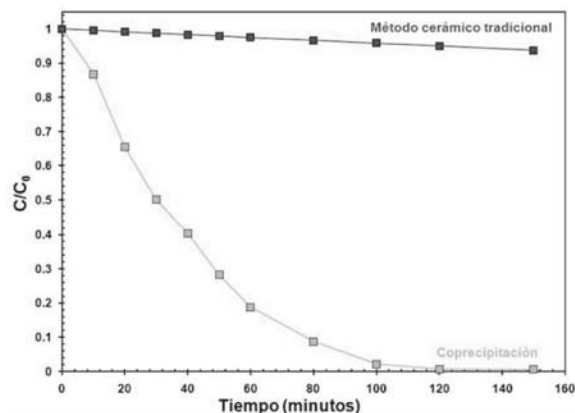


Fig. 4. Fotodegradación de rodamina B en presencia de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$.

La actividad fotocatalítica del molibdato $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ se evaluó mediante la degradación del colorante rodamina B. Los resultados se muestran en la figura 4. A partir de ésta se calcularon las constantes cinéticas, mediante el modelo de Langmuir-Hinshelwood, para una reacción de primer orden, tal como se describe en un trabajo

previo.⁶ Se observó un notable descenso en el tiempo de vida media del colorante, desde 1386 minutos, cuando se emplea el fotocatalizador sintetizado por estado sólido, hasta sólo 29.4 minutos para el caso en el que se utilizó como fotocatalizador al molibdato sintetizado por coprecipitación.

Es evidente que la actividad fotocatalítica del material de coprecipitación fue aproximadamente 47 veces mayor con respecto al material obtenido por el método cerámico tradicional. Dicha diferencia puede explicarse de acuerdo a la síntesis del óxido: mientras el método cerámico tradicional proporciona un material altamente sinterizado y una baja área superficial, la técnica de coprecipitación provee un material de mayor área superficial, con una mayor concentración de sitios activos en su superficie.

Las muestras de la fase $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ obtenidas por coprecipitación presentaron una fuerte interacción con el colorante orgánico, lo que condujo a que un porcentaje importante de moléculas de rhB fueran adsorbidas en la superficie del fotocatalizador. Ante esta situación, fue necesario dar un tratamiento experimental diferente al seguido con $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$, con el fin de caracterizar debidamente la actividad fotocatalítica de $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$. Por ello se realizaron experimentos a diferentes concentraciones iniciales del colorante en presencia del semiconductor, bajo condiciones de oscuridad, con el objetivo de evaluar el grado de adsorción en cada muestra calcinada, previo al estudio de su actividad fotocatalítica.

En la figura 5 se muestra la evolución de la concentración del colorante rhB en presencia de la fase $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, sintetizada a diferentes temperaturas, bajo irradiación de luz visible. Como se puede observar en la figura, el proceso puede ser dividirse en tres etapas distintas: (a) dispersión mediante ultrasonido del fotocatalizador en la disolución del colorante bajo condiciones de oscuridad; (b) establecimiento del equilibrio de adsorción-desorción en oscuridad; (c) degradación del colorante bajo luz visible. El equilibrio adsorción-

desorción se alcanzó durante los primeros quince minutos de contacto entre el fotocatalizador y la disolución de rodamina B bajo oscuridad.

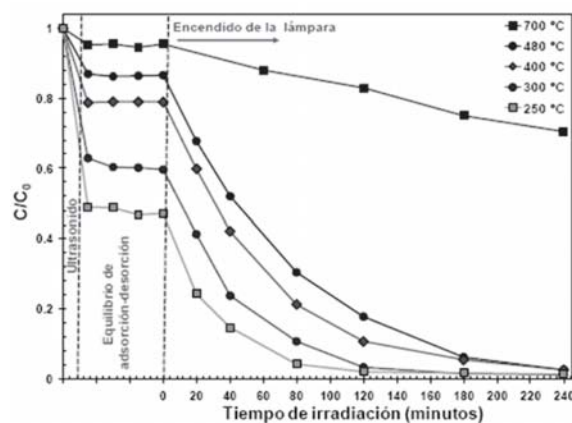


Fig. 5. Fotodegradación de rodamina B en presencia de $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ obtenido por coprecipitación.

En general, todas las muestras fueron capaces de degradar rhB; sin embargo, esto ocurrió a diferentes velocidades. La muestra calcinada a 250°C presentó el efecto más marcado, necesitó sólo 80 minutos de irradiación de luz visible para la completa decoloración de la solución, en comparación con aproximadamente 240 minutos que necesitó la muestra calcinada a 480°C para llegar al mismo punto.

Con el fin de determinar el grado de mineralización de rhB, por acción de los molibdatos propuestos, se realizaron experimentos para determinar el grado de carbono orgánico total (TOC) de muestras con distintos tiempos de irradiación de luz visible. Especial énfasis se puso en el uso de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ como fotocatalizador, ya que éste presentó una mejor actividad fotocatalítica que $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, además de no presentar un fenómeno de adsorción de colorante considerable, como para dificultar la interpretación de resultados. De acuerdo a los resultados obtenidos, el grado de mineralización del colorante fue alrededor de 85.7% a 100 horas de irradiación con luz visible. Estos valores nos dan la certeza que ocurre la mineralización de rodamina B a CO_2 y H_2O , al utilizar el semiconductor $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$.

Para la deposición de película delgada se eligió el fotocatalizador $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$, dada su mayor actividad fotocatalítica con respecto $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$. El depósito del molibdato $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ se realizó al colocar rejillas de cobre y placas de vidrio dentro del sistema de evaporación térmica. En particular, la recolección de partículas sobre una rejilla de cobre tuvo el propósito de conocer su naturaleza y morfología mediante TEM y SEM. La figura 6(a) muestra una micrografía por TEM de las partículas depositadas sobre una rejilla de Cu con película de Fomvar. En la imagen se pueden observar partículas redondas de entre 12 y 17 nm de diámetro, así como la presencia de nanopartículas más pequeñas, con diámetro alrededor de 3 nm, con apariencia de puntos.

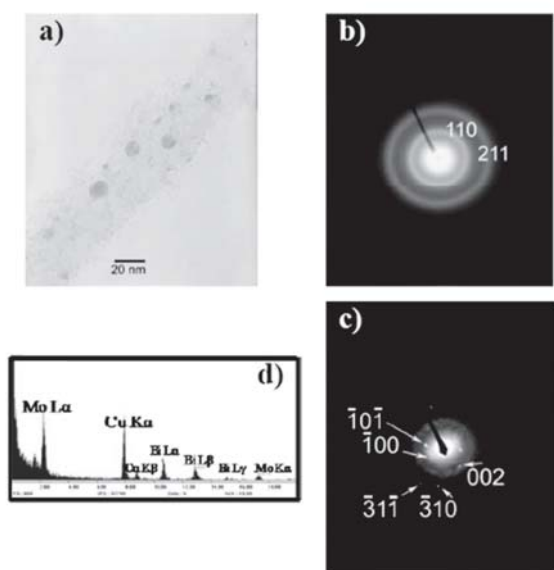


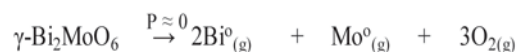
Fig. 6. Imagen tomada por TEM y difracción de electrones de partículas depositadas sobre rejilla de Cu.

Al realizar una difracción de electrones en toda la imagen, se obtiene un patrón de difracción en forma de anillos como el que se muestra en la figura 6(b). Una difracción en forma de anillos indica que existen cristales, en este caso nanopartículas mucho más pequeñas que el diámetro del haz con el que se realiza la difracción. Además,

estos anillos pudieron ser fácilmente indexados con los planos (110) y (211) de la estructura bcc del Mo. Cuando el diámetro del haz se redujo a los 5 nm para alcanzar condiciones de nanodifracción, se obtuvo un patrón de *spots*, como el que se muestra en la figura 6(c).

Esta prueba de nanodifracción fue dirigida sobre la partícula que se encuentra en el centro de la imagen, con la finalidad de obtener su estructura cristalina, pero, como se puede apreciar, durante la prueba posiblemente se alcanza el dominio de otro cristal, ya que se aprecia una difracción con una segunda orientación. La indexación de estos *spots* correspondió a los planos de la estructura hexagonal del Bi.

De acuerdo a lo anterior, el análisis por TEM indica que la evaporación de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ dentro de la cámara es acompañada por una descomposición en sus correspondientes elementos metálicos, como se describe en la siguiente ecuación:



Transcurrido este proceso, las nanopartículas de ambos elementos se depositan en el sustrato en su forma metálica. De acuerdo a la difracción de electrones, las nanopartículas de mayor dimensión corresponden al Bi, mientras que las de Mo son más pequeñas con apariencia de puntos discretos.

La figura 7(b) muestra la apariencia física de la película depositada en el sustrato de vidrio. La película mostró una coloración negra de aspecto metálico, lo que concuerda con los resultados obtenidos por TEM, que indican la presencia de un depósito metálico. La película metálica se trató térmicamente, a 550°C por 4 h en aire, con el propósito de formar el molibdato $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ por captura de oxígeno atmosférico. El resultado de este proceso fue un remarcado cambio en la coloración de la película, de negro a amarillo pálido (figura 7(c)). El color desarrollado por la película fue similar al color característico de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ en forma policristalina. Para fines comparativos

se incluye, en la figura 7(a), la apariencia física del sustrato de vidrio sin depósito de material. La formación de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ por tratamiento térmico se confirmó por difracción de rayos-X.

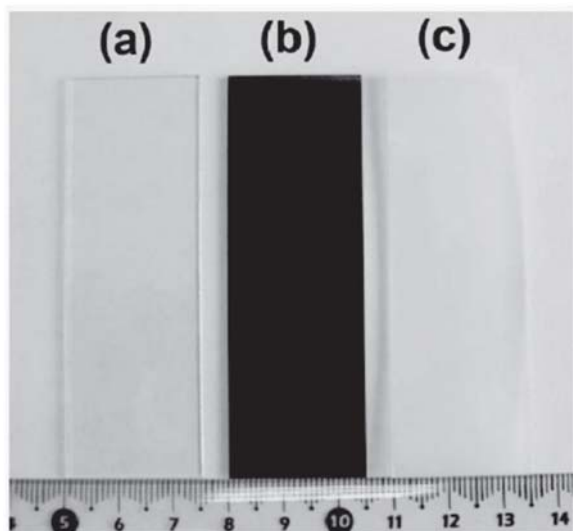


Fig. 7. Sustrato de vidrio utilizado para el depósito de película mediante evaporación térmica de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$.

La actividad fotocatalítica de la película delgada de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ se evaluó mediante la degradación de una película de rhB depositada sobre la superficie del fotocatalizador. Para este fin se depositó rhB en forma de película sobre la superficie del fotocatalizador. La figura 8 muestra la evolución temporal de la coloración de la película de rhB depositada sobre el fotocatalizador, cuando ésta fue expuesta a la fuente de radiación visible.

Como puede observarse en la figura 8(a), el color de la rhB experimenta un importante descenso en su intensidad en 2 h de exposición a la radiación visible, y prácticamente se alcanza una decoloración total, luego de 6 h. Un experimento similar se realizó en ausencia de la película del fotocatalizador, a manera de referencia. La figura 8(b) muestra para este caso un blanqueamiento lento de la película de rhB, debido a un proceso de fotólisis del colorante. No obstante, el color rosa característico de la rhB permaneció aun después de 32 h de exposición a la radiación visible.

Lo anterior indica que es necesaria la combinación fotocatalizador/radiación visible para eliminar al colorante orgánico.

Este hecho es de notable relevancia desde un punto de vista práctico. Tener un sistema para purificar agua con base en el uso de una película de fotocatalizador permitirá eliminar el costoso proceso de remoción del mismo, una vez transcurrido el proceso de eliminación de contaminantes. Puesto que, en parte, la actividad fotocatalítica del óxido está en función de su tamaño de partícula, su separación del medio acuoso representa un reto mayor. Más aún, obtener un fotocatalizador en forma de película permite su aplicación no sólo en medio acuoso, sino para sistemas de purificación de aire para la eliminación de NO_x y compuestos orgánicos volátiles.

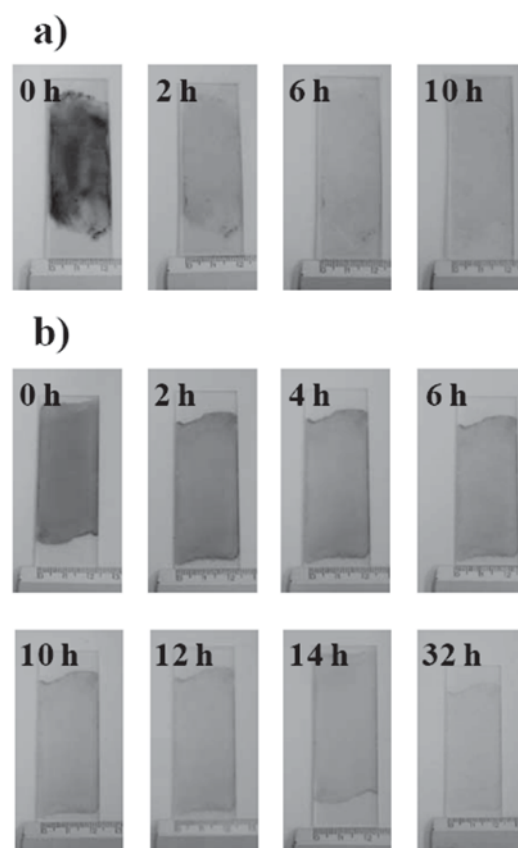


Fig. 8. Evolución temporal de la coloración de una película de rhB bajo irradiación de luz visible sobre la superficie del fotocatalizador a), y sobre un sustrato de vidrio b).

Conclusiones

El trabajo presentado comprende un estudio sobre la actividad fotocatalítica de molibdatos de bismuto para la remoción de contaminantes orgánicos en medio acuoso por acción de radiación visible. El estudio comprende, desde una exploración del diagrama de fases $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-MoO}_3$ para la elección de los molibdatos a probar en función de sus propiedades físicas, la detección de actividad fotocatalítica en los mismos. Pasando por una potenciación de dicha actividad por la preparación de los óxidos por rutas alternas de síntesis, hasta la aplicación del mejor fotocatalizador en forma de película delgada; con miras a una aplicación tecnológica a mediano plazo. Lo anterior nos permite tener un panorama global de las capacidades de los molibdatos $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ y $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ para determinar la viabilidad de su real aplicación en dispositivos purificadores de agua e incluso de aire.

El presente trabajo de investigación busca contribuir al desarrollo del conocimiento científico del área y, más allá de experimentos modelo de laboratorio, dar un paso hacia la aplicación tecnológica en película delgada. Para este propósito se eligió al fotocatalizador $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$, dada su mayor actividad fotocatalítica con respecto $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$. Los resultados mostraron una retención de la actividad fotocatalítica del óxido cuando éste se depositó en forma de película en un sustrato de vidrio.

Resumen

Los molibdatos $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ y $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ fueron sintetizados por coprecipitación y probados como fotocatalizadores para la degradación de rodamina B, bajo radiación visible. El grado de mineralización alcanzado fue de 85.7%, luego de 100 h de irradiación, cuando se utilizó $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ como fotocatalizador. En una segunda parte del trabajo se formó película delgada de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ mediante un proceso secuencial de evaporación/descompo-

sición del óxido en un sistema de evaporación térmica (TES). La película delgada de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ mostró actividad fotocatalítica para la degradación de rodamina B bajo radiación de luz visible.

Palabras clave: Fotocatálisis heterogénea, $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$, $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, Molibdatos, Película delgada.

Abstract

$\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ and $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ $\text{Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ were synthesized by the coprecipitation method and tested as photocatalysts for the degradation of rhodamine B under visible light irradiation. The degree of mineralization reached after 100 h of irradiation was 85.7% for rhB when $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ was used as photocatalyst. In a second part of the work, thin films of $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ were formed by a decomposition/evaporation sequential process in a Thermal Evaporation System (TES). Thin films of $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ showed photocatalytic activity for the degradation of rhodamine B under visible light irradiation.

Keywords: Heterogeneous photocatalysis, $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$, $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, Molybdates, Thin film.

Agradecimientos

Agradecemos al Conacyt por su apoyo a este trabajo de investigación, a través del proyecto 81546, y a la UANL, por el apoyo del proyecto Paicyt 2008.

Referencias

1. Z. Ding, G.Q. Lu, P.F. Greenfield, Role of the crystallite phase of TiO_2 in heterogeneous photocatalysis for phenol oxidation in water, *J. Phys. Chem. B* 104 (2000) 4815-4820.
2. C. H. Huang, I-K. Wang, Y-M. Lin, Y-H. Tseng, C-M. Lud, Visible light photocatalytic degradation of nitric oxides on PtO_x -modified

- TiO₂ via sol-gel and impregnation method, J. Mol. Catal. A: Chem. 316 (2010) 163-170.
3. Q. Xu, D. V. Wellia, M. Alam Sk, K. H. Lim, J. S. C. Loo, D. W. Liao, R. Amal, T. T. Y. Tan, Transparent visible light activated C-N-F-codoped TiO₂ films for self-cleaning applications, J. Photoch. Photobio. A 210 (2010) 181-187.
 4. L. Dapeng, Q. Jiuhui, The progress of catalytic technologies in water purification: A review, J. Environ. Sci. 21(2009) 713-719.
 5. A. Martínez-de la Cruz, S. Obregón Alfaro, Synthesis and characterization of γ -Bi₂MoO₆ prepared by co-precipitation: photoassisted degradation of organic dyes under Vis-irradiation, J. Mol. Catal. A: Chem. 320 (2010) 85-91.
 6. S. Obregón Alfaro. Síntesis y caracterización de nanopartículas de óxidos de los sistemas Bi₂O₃-MoO₃ y Bi₂O₃-WO₃ para la degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos bajo luz visible. Tesis de maestría, FIME-UANL (2009).
 7. B. Ohtani. (2008). Preparing articles on photocatalysis, Catal. Lett. 37 (2008) 217-229.

Recibido: 01 agosto 10

Aceptado: 01 septiembre 10