

Catálisis en México



REVISTA INTERDISCIPLINARIA EN

Nanociencias y Nanotecnología

Catálisis en México

Rodolfo Zanella Specia
Julia Aguilar Pliego
Rogelio López Torres
(coordinadores)

Vol. 10, Núm. 18, enero-junio, 2017

www.mundonano.unam.mx

doi: 10.22201/ceiich.24485691e.2017.18

DIRECTORIO

Universidad
Nacional
Autónoma
de México

Dr. Enrique Graue Wiechers
Rector
Dr. Leonardo Lomelí Vanegas
Secretario General
Dr. William Henry Lee Alardín
Coordinador de la Investigación Científica
Dr. Domingo Alberto Vital Díaz
Coordinador de Humanidades

Mtro. Juan Manuel Romero Ortega
Coordinador de Innovación y Desarrollo
Dra. Guadalupe Valencia García
Directora CEIICH
Dr. Oscar Edel Contreras López
Director CNYN
Dr. Rodolfo Zanella Specia
Director CCADET

Mundo Nano • <http://www.mundonano.unam.mx>

Editores

Dr. Gian Carlo Delgado Ramos • gandelgado@unam.mx / Dr. Rodolfo Zanella Specia • rodolfo.zanella@ccadet.unam.mx
Dr. Oscar Edel Contreras López • edel@cnyn.unam.mx

Editor Asociado

M. en C. Mario Rogelio López Torres • mrlt@unam.mx

COMITÉ EDITORIAL

Física (teoría)

Dr. Sergio Ulloa
• ulloa@ohio.edu
*Departamento de Física y Astronomía–
Universidad de Ohio. Estados Unidos*
Dr. Luis Mochán Backal
• mochan@em.fis.unam.mx
Instituto de Ciencias Físicas–UNAM. México
Dr. Noboru Takeuchi Tan
• takeuchi@cnyn.unam.mx
*Centro de Nanociencias y Nanotecnología–
UNAM*

Física (experimental)

Dr. Isaac Hernández Calderón
• Isaac.Hernandez@fis.cinvestav.mx
Departamento de Física–CINVESTAV. México
Ingeniería

Dr. Sergio Alcocer Martínez de Castro
• SAlcocerM@ingen.unam.mx
Instituto de Ingeniería–UNAM. México

Microscopía

Dr. Miguel José Yacamán
• miguel.yacamán@utsa.edu
*Departamento de Ingeniería Química–Uni-
versidad de Texas en Austin. Estados Unidos*
Catálisis

Dr. Sergio Fuentes Moyado
• fuentes@cnyn.unam.mx
*Centro de Nanociencias y Nanotecnología–
UNAM. México*

Dr. Rodolfo Zanella Specia
• rodolfo.zanella@ccadet.unam.mx
*Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo
Tecnológico–UNAM. México*

Dra. Gabriela Díaz Guerrero
• diaz@fisica.unam.mx
Instituto de Física–UNAM. México

Materiales

Dr. José Saniger Blesa
• jose.saniger@ccadet.unam.mx

*Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo
Tecnológico–UNAM. México*
Dr. Roberto Escudero Derat
• escu@unam.mx
*Instituto de Investigaciones en Materiales–
UNAM. México*

Ciencia, tecnología y género

Dra. Norma Blazquez Graf
• blazquez@unam.mx
*Centro de Investigaciones Interdisciplinarias
en Ciencias y Humanidades–UNAM. México*
Filosofía de la ciencia

Dr. León Olivé Morett
• olive@unam.mx
*Instituto de Investigaciones Filosóficas–
UNAM. México*

Complejidad de las ciencias

Dr. José Antonio Amozurrutia
• amoz@labcomplex.net
*Centro de Investigaciones Interdisciplinarias
en Ciencias y Humanidades–UNAM. México*
Dr. Ricardo Mansilla Corona
• mansy@unam.mx

*Centro de Investigaciones Interdisciplinarias
en Ciencias y Humanidades–UNAM. México*

Aspectos éticos, sociales y ambientales de la nanociencia y la nanotecnología

Dra. Fern Wickson
Genøk Center for Biosafety, Tromsø. Noruega
Dr. Roger Strand
• roger.strand@svt.uib.no

*Centro para el Estudio de las Ciencias y las Hu-
manidades–Universidad de Bergen. Noruega*
Dr. Pedro Serena Domingo

*Instituto de Ciencia de Materiales
de Madrid–CSIC. España*

Medio ambiente, ciencia y tecnología

Dra. Elena Álvarez-Buyllá
• eabuylla@gmail.com
Instituto de Ecología–UNAM. México

Dr. Rodolfo Omar Arellano Aguilar
• omararellano@ciencias.unam.mx
Facultad de Ciencias–UNAM. México
Ciencia, tecnología y sociedad

Dr. Louis Lemkow
• Louis.Lemkow@uab.es
*Instituto de Ciencia y Tecnología Ambiental–
Universidad Autónoma de Barcelona. España*
Dra. Sofia Liberman Shkolnikoff

Facultad de Psicología–UNAM. México
Dr. Paulo Martins
• marpaulo@ipt.br
*Instituto de Pesquisas Tecnológicas do
Estado de São Paulo. Brasil*

Mtra. Kamilla Kjolberg
• kamilla.kjolberg@svt.uib.no
*Centro para el Estudio de las Ciencias y
las Humanidades–Universidad de Bergen.
Noruega*

Dr. Simone Arnaldi
• simonearnaldi@gmail.com
CIGA–Universidad de Padova. Italia
Divulgación

Dra. Julia Tagüeña Parga
• [CIE-UNAM. México](mailto:CIE-UNAM)
Dr. Aquiles Negrete Yankelevich
*Centro de Investigaciones Interdisciplinarias
en Ciencias y Humanidades–UNAM. México*
Dr. Joaquín Tutor Sánchez
*ETSI–ICAI, Universidad Pontificia Comillas.
España*

Cuidado de la edición CEIICH–UNAM:

Concepción Alida Casale Núñez
María del Consuelo Yerena Capistrán
Isauro Uribe Pineda (Formación)
**Gestión y operación de Open Journal
Systems:**
María del Consuelo Yerena Capistrán
Isauro Uribe Pineda

Número financiado parcialmente por la Academia de Catálisis, A. C.



Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, Vol. 10, Núm. 18, enero–junio 2017, es una publicación semestral, en versión electrónica, editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México, a través del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, el Centro de Nanociencias y Nanotecnología y el Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Torre II de Humanidades 4º piso, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México. <<http://www.mundonano.unam.mx>>, (mundonanounam@gmail.com). Editores responsables: Gian Carlo Delgado Ramos, Rodolfo Zanella Specia y Oscar Edel Contreras López. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo Núm. 04-2015-062512122500-203, otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, ISSN 2448-5691. Responsable de la última actualización de este número: Isauro Uribe Pineda, Torre II de Humanidades 4º piso, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México. Fecha de la última actualización: 26 de mayo de 2017. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura de los editores. Prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin la previa autorización por escrito de los editores responsables.

CONTENIDO

Vol. 10, Núm. 18, enero–junio 2017 / doi: 10.22201/ceiich.24485691e.2017.18

5 PRÓLOGO

7 INTRODUCCIÓN

La catálisis en México

Jorge Noé Díaz de León, Julia Aguilar Pliego

CATÁLISIS EN MÉXICO

17 Panorama de la investigación en catálisis en la Facultad de Química de la UNAM
Aída Gutiérrez Alejandre

31 Instituto de Química de la UNAM: catalizando la química con paso firme
Tomás Guerrero, José G. López-Cortés

47 Instituto de Física-UNAM
Gabriela Díaz Guerrero

57 La catálisis en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico
Rodolfo Zanella

69 Catálisis en Baja California
J. Noé Díaz de León, Luz A. Zavala-Sánchez

85 La catálisis en la Universidad Autónoma Metropolitana–Unidad Azcapotzalco
Julia Aguilar Pliego

95 UAM-Iztapalapa División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Nancy Martín Guaregua, José Antonio de los Reyes Heredia

103 Grupo de investigación en Química de Materiales, Departamento de Ciencias Básicas, División de CBI, Universidad Autónoma Metropolitana
Ana Marisela Maubert Franco, Elizabeth Rojas García, Ricardo López Medina

113 Laboratorio de Catálisis y Materiales, ESIQIE–IPN
Miguel A. Valenzuela, Salvador Alfaro

126 Catálisis en el Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, UAEM–UNAM
Dora Alicia Solís-Casados, Reyna Natividad-Rangel, Rubí Romero Romero, Rosa María Gómez-Espinosa

137 La catálisis y fotocatalisis en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León
Javier Rivera de la Rosa

147 Investigación en catálisis en la Universidad Michoacana
José Luis Rico Cerda

Correspondencia: Revista *Mundo Nano*,
Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias
y Humanidades, Torre II de Humanidades 4º piso,
Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, Ciudad de México, México.
Correo-e: mundonanonam@gmail.com

Diseño de portada:
Angeles Alegre Schettino.
Grabado de
Sergio A. Gómez Torres.
Taller: Utopía Gráfica A. C.



- 153 La catálisis en la Universidad Veracruzana
*María C. Barrera Domínguez, Carolina Solís Maldonado,
Raúl Alejandro Luna Sánchez, Benoit Auguste Roger F., Sara Núñez Correa*
- 163 Laboratorio de Nuevos Materiales Nanoestructurados y Catálisis Heterogénea, División de Materiales Avanzados, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.
Vicente Rodríguez-González
- 175 Unidad de Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán
*Juan Carlos Chavarría Hernández, Luis Carlos Ordóñez López,
Beatriz Escobar Morales, Daniela Esperanza Pacheco Catalán*
- 186 Catálisis en el Instituto Tecnológico de Celaya
Juan C. Fierro-González
- 198 Investigación y desarrollo en catálisis en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
*Luis Escobar Alarcón, Suilma Marisela Fernández Valverde, Jaime Jiménez Becerril,
Régulo López Callejas, Raúl Valencia Alvarado, Raúl Pérez Hernández*
- 216 **INSTRUCTIVO PARA AUTORES**



Sergio A. Gómez Torres, *Nano-Mundo*, 2017.
Punta seca impresa sobre papel Guarro, Canson, 33.6 × 20.0 cm.

El grabado representa el proceso nanocatalítico. En el círculo oscuro todo se encuentra en el estado primario de caos. Simboliza el desorden molecular antes del rompimiento y formación de un enlace químico; la armonía y el orden encauzados por una reacción química y la formación de una nueva molécula. La conexión con el círculo central representa la armonía química, la cual es iniciada por Apolo, dios de la luz, el sol y el conocimiento, quien transmite la potencialidad energética y el conocimiento, a través de nanoestructuras creadas que permiten la formación catalítica de la materia. La composición e idea son del autor.

Referencias: R. Fludd, *Philosophia Moysaica*, Gouda 1638; los grabados de É. A. Bayard y A. de Neuville para la novela *Viaje alrededor de la luna*, de Julio Verne, 1870; y G. A. Somorjai, L. Yimin, *Introduction to Surface Chemistry and Catalysis*, 2010.

Prólogo

El presente número de *Mundo Nano* está dedicado a la catálisis en México, disciplina que ha generado aplicaciones de enorme valor industrial y comercial, y en donde continuamente se realizan importantes aportes al conocimiento básico y aplicado a nivel mundial, en diferentes áreas. La catálisis es el proceso por el cual se modifica la velocidad de una reacción química, debido a la participación de una sustancia llamada catalizador. F. W. Ostwald definió un catalizador como “una sustancia que incrementa la velocidad a la cual el sistema se aproxima al equilibrio, sin ser consumido en el proceso”. Un catalizador puede acelerar dramáticamente una reacción química, o modificar la distribución de productos, favoreciendo la producción de uno específico. Los catalizadores funcionan proporcionando un mecanismo (alternativo) que involucra un estado de transición diferente y una menor energía de activación. En las reacciones catalíticas (principalmente las heterogéneas), el tamaño, la dimensionalidad, la composición química y la morfología de las partículas (casi siempre nanométricas) que constituyen la fase activa del catalizador tienen un efecto muy importante sobre las propiedades del mismo, por lo que en años recientes se ha acuñado el término “nanocatálisis” para definir la catálisis en la que están involucrados materiales nanométricos.

La catálisis es una de las disciplinas de las que surgen los primeros estudios relacionados con la síntesis de materiales nanoestructurados en México; sin embargo, existe poca información organizada y sistematizada sobre las instituciones que realizan investigación o desarrollo en el área, así como de sus líneas de investigación, el número de académicos, la infraestructura disponible y los principales logros que se han tenido en esta importante disciplina en el país. De ahí la importancia de darle este espacio especial a la catálisis en *Mundo Nano*.

La Academia de Catálisis A.C. (ACAT), es una sociedad sin fines de lucro, cuyo objetivo fundamental es promover y difundir actividades relacionadas con la investigación, la docencia y el desarrollo tecnológico en catálisis, organizó junto con *Mundo Nano* este número especial cuyo objetivo fue recopilar, sistematizar y difundir información sobre este importante campo de investigación y desarrollo en nuestro país.

La ACAT tiene identificadas más de 30 instituciones o dependencias universitarias a nivel nacional que realizan actividades de investigación y desarrollo en catálisis. Todas estas instituciones fueron invitadas a redactar un manuscrito tratando de ofrecer una panorámica de las actividades de investigación, desarrollo, docencia y extensión relacionadas con la catálisis. Entre los aspectos que se solicitó describir se encuentran una breve presentación de la entidad; líneas de investigación y desarrollo en catálisis, tanto las desarrolladas como las que están en curso; infraestructura disponible; resumen de producción científica e instrumentos de protección de propiedad intelectual.

tual solicitados u otorgados; docencia y formación de recursos humanos en el área, los principales logros, las áreas de oportunidad y perspectivas en su campo de investigación. Adicionalmente, se publicó una convocatoria abierta en la página de la ACAT, para que las instituciones que así lo desearan enviaran una contribución. Se recibieron 17 manuscritos, y el Instituto Mexicano del Petróleo respondió que su actividad en catálisis se describe en un artículo previo publicado en el “Catálogo Nacional de Instituciones de Investigación con actividades en Nanociencia y Nanotecnología”, organizado por esta misma revista (*Mundo Nano*, vol. 9, núm. 17: 141-158), por lo que si se requiere información de dicha institución debe consultarse el referido artículo.

De las instituciones o entidades que contribuyeron a este número, cinco son entidades pertenecientes a la Universidad Nacional Autónoma de México, tres pertenecen a la Universidad Autónoma Metropolitana, una al Instituto Politécnico Nacional, tres son universidades estatales (Universidad Autónoma de Nuevo León, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y Universidad Veracruzana), uno es un centro conjunto entre la Universidad Autónoma del Estado de México y la UNAM, dos son centros CONACYT (IPICYT y CICY), así como el Instituto Tecnológico de Celaya y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

Si bien es claro que no todas las instituciones con actividades de investigación y desarrollo en catálisis en México se encuentran representadas en este número especial de *Mundo Nano*, lo consideramos un primer paso fundamental para conocer, organizar y sistematizar información referente a esta importante disciplina en el país, para servir de base y poder posicionarla de mejor manera ante sociedades internacionales y organismos financiadores de investigación tanto en México como en el extranjero, lo cual esperamos que redunde en beneficios en el corto, mediano y largo plazo para nuestra comunidad.

La ACAT agradece a todos los colegas el esfuerzo por contribuir a esta iniciativa y seguirá realizando acciones entre sus socios y en general entre la comunidad catalítica mexicana, para contar con información lo más certera posible sobre diferentes aspectos de los estudios en catálisis que se realizan en México, y así promover la colaboración y la vinculación entre los diferentes grupos, y lograr el mejor posicionamiento de la catálisis mexicana en el contexto nacional e internacional, con miras a potenciar las capacidades de nuestra comunidad.

La catálisis en México

Jorge Noé Díaz de León,* Julia Aguilar Pliego**

Debido al gran abanico de instituciones, líneas de investigación, investigadores y posgrados ofrecidos a lo largo del territorio nacional en catálisis y temas afines, se invitó a la comunidad catalítica en forma institucional y por medio de la página de la ACAT (<http://www.acat.org.mx/>) a contribuir en la realización de esta recopilación nacional de instituciones con actividades de investigación y desarrollo en catálisis. La respuesta a esta convocatoria ha sido exitosa pues se recibieron artículos de 16 instituciones, con lo que esperamos ofrecer una panorámica robusta de las diferentes actividades en catálisis que se realizan en cada entidad. Entre los aspectos destacados en este catálogo están: la presentación de cada entidad; líneas de investigación y desarrollo, tanto las desarrolladas como las que están en curso; infraestructura disponible; docencia y formación de recursos humanos; principales logros de sus miembros; perspectivas en el campo de investigación, además de los espacios digitales correspondientes a cada institución. En nuestro país existen numerosos centros de investigación, así como universidades en donde se realiza investigación relacionada con catálisis. Cabe mencionar, que, a nivel nacional, existe una gran variedad en temas de investigación.

A continuación, se presenta un análisis comparativo de las publicaciones a nivel mundial y las publicaciones de México. En la figura 1 se muestra una gráfica con la cantidad de publicaciones realizadas en el mundo relacionadas con el tema de catálisis. Mientras que en la figura 2 se pueden observar los valores de la búsqueda por país, seguimiento realizado en la plataforma Web of Science¹ para 2016 y lo que va de 2017.

Los tópicos mostrados están relacionados con la actividad de los miembros de la ACAT, sin embargo, no es posible agrupar en una sola palabra toda la investigación que se realiza en México y la diversidad existente puede ir desde el estudio de la síntesis, la caracterización de catalizadores (metales, metales-soportados, óxidos, sulfuros, materiales mesoporosos nanoestructurados, zeolitas, materiales organometálicos, entre otros muchos) y su aplicación en diferentes tipos de reacción y de procesos, como: fotocatalisis, hidrosulfuración (HDS), hidrosodiooxigenación (HDO), hidrosodiooxigenación (HDN), tecnología del hidrógeno, transformación de biomasa para obtención

* Universidad Nacional Autónoma de México-Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Ensenada, Baja California.

** Área de Química Aplicada, Depto. C. B. UAM-A, Ciudad de México.

¹ <https://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.o?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=4FRpS4qYmoaChZZnkyv&xpreferencesSaved=>>.

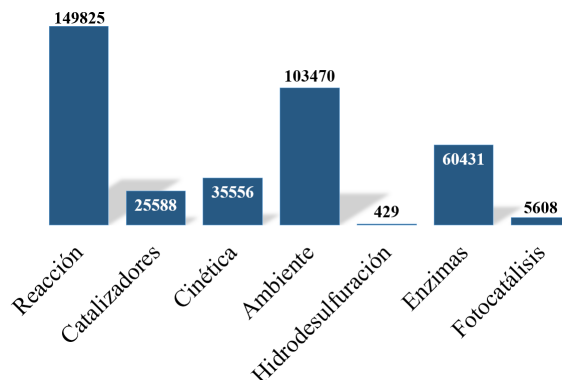


Figura 1. Número de publicaciones relacionadas con tópicos sobre catálisis en el mundo.

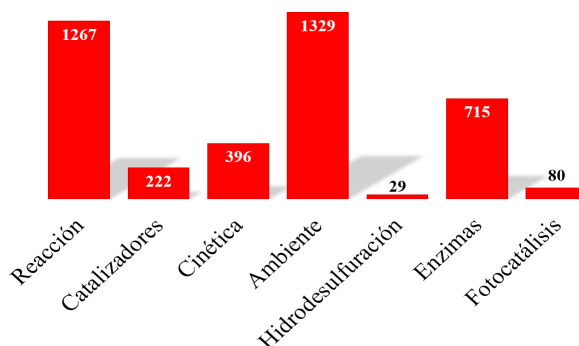


Figura 2. Número de publicaciones relacionadas con tópicos sobre catálisis en México.

de productos de alto valor agregado como biodiesel, bioturbosina, biogasolina, desulfuración oxidativa, desarrollo de procesos catalíticos, materiales nanoestructurados, catalizadores para celdas de combustible, catálisis enzimática, catálisis biomimética, entre otros. Lo que proporciona un gran abanico de líneas de investigación desarrolladas por los socios de la Academia. A pesar del gran dinamismo que se presenta en torno a la investigación, la docencia y la formación de recursos humanos en catálisis en México, no existe un posgrado en catálisis o una institución que se dedique exclusivamente al desarrollo de proyectos relacionados con esta disciplina, a diferencia de lo que ocurre en otros países, en los que sí hay institutos o centros dedicados exclusivamente al estudio de la misma. Es por esta razón que es importante mostrar la oferta nacional en investigación y desarrollo que tenemos en México en esta disciplina, tanto para la realización de estudios universitarios y

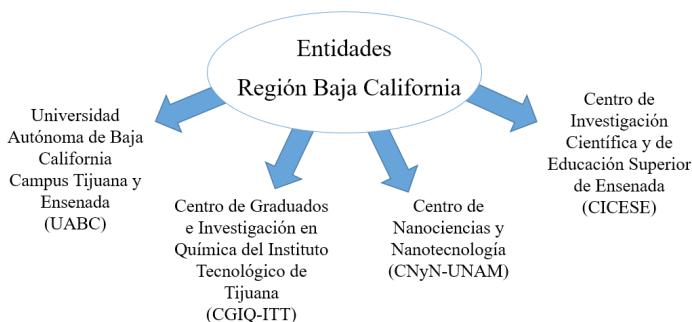
de posgrado como para la colaboración interinstitucional. De la misma forma, se pretende que este catálogo permita al sector industrial tener una idea de a qué instituciones (investigadores) se puede acudir en busca de posibles soluciones para resolver sus problemas, sobre todo porque la catálisis trasciende a todos los aspectos de la cadena de producción industrial y tecnológica. El catálogo se presentará de acuerdo con las representaciones regionales en las que está organizada la ACAT, a saber, Baja California, Veracruz, Bajío, Norte, Occidente y Valle de México.

Región Baja California

Las instituciones en las que se realiza investigación y desarrollo en catálisis en esta demarcación son el Centro de Graduados e Investigación en Química del Instituto Tecnológico de Tijuana (CGIQ-ITT), el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (CNyN-UNAM), el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) en sus campus Tijuana y Ensenada (véase la figura3).

En estas instituciones se están desarrollando diversas temáticas que van desde la catálisis homogénea hasta la producción industrial de catalizadores. Estas temáticas de investigación, así como los académicos asociados a éstas están descritas en una de las contribuciones que aparecen en este número especial. En esta región se cuenta con varios reactores de laboratorio por lotes y de flujo continuo para reacciones diversas como deshidratación de alcoholes, fotocatálisis o reacciones de desplazamiento de vapor de agua, destaca una planta para la evaluación de catalizadores de hidropurificación a escala de banco. Asimismo, se cuenta con un microscopio JEOL JEM-2100F (STEM) con cañón de electrones tipo emisión de campo-Schottky, con modo barrido, adquisición digital de imágenes, análisis químico por medio de espectroscopía de dispersión de energía (EDS), se pueden realizar mapas y espectroscopía de pérdida de energía de electrones (EELS). Así como un equipo

Figura 3. Entidades en las que se realiza catálisis de la Región Baja California.



SPECS para análisis de espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) que cuenta con una cámara de tratamientos a alta temperatura y presión, así como un analizador hemisférico con resolución angular. Además, en estas instituciones se ofrecen alrededor de 7 programas para estudios de licenciatura, maestría y doctorado que involucran temas de catálisis. Esta región cuenta con más de 20 miembros activos afiliados a la ACAT y su representante es el Dr. Jorge Noé Díaz de León.

Región Veracruz

Comprende las actividades de investigación y docencia realizadas en los laboratorio multidisciplinarios de la Universidad Veracruzana (UV) ubicados en sus cinco campus Xalapa, Coatzacoalcos–Minatitlán, Orizaba–Córdoba, Poza Rica–Tuxpan, y Veracruz–Boca del Río relacionadas con catálisis y nanomateriales diseñados para este propósito. Como es sabido, esta región del país es importante por su riqueza petrolera, donde, en general, se realiza investigación en diseño, síntesis y caracterización de catalizadores ácidos para la obtención de biocombustible a partir de biomasa, caracterización de residuos agrícolas para su uso como material catalítico, eliminación de microcontaminantes en aguas mediante procesos avanzados de oxidación, degradación de azocompuestos mediante procesos catalíticos, simulación de procesos, procesos y sustentabilidad y procesos de superficie, entre otros. Aquí se tienen técnicas de caracterización como espectroscopía de UV-vis, calorimetría diferencial de barrido, espectroscopía de infrarrojo, por mencionar algunos.

Además, en esta región se encuentra la unidad de Servicios de Apoyo en Resolución Analítica (SARA), Dependencia de la Dirección General de Investigaciones, creada mediante la participación activa de un grupo de investigadores de la Universidad Veracruzana, con el fin de ofrecer servicios de alta tecnología a profesionales de la investigación.

Región Bajío

Aquí se encuentran los estados de Querétaro, San Luis Potosí y Guanajuato. Las entidades que tienen miembros de la ACAT en estos estados son la Universidad Autónoma de Querétaro, la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, la Universidad de Guanajuato (UGTO) y el Instituto Tecnológico de Celaya. Sus miembros están enfocados en el análisis y preparación de catalizadores creados a partir de nuevos materiales como el grafeno, nanotubos de carbono y/o compuestos organometálicos. Estos materiales se analizan en reacciones de fotocatalisis, sensores de gases, deshidratación de alcoholes, oxidación de CO, carbonilaciones de metanol, hidrogenación de CO₂, deshidrogenación selectiva de aminas, entre otras. En esta región se cuenta con reactores hidrotérmicos asisti-

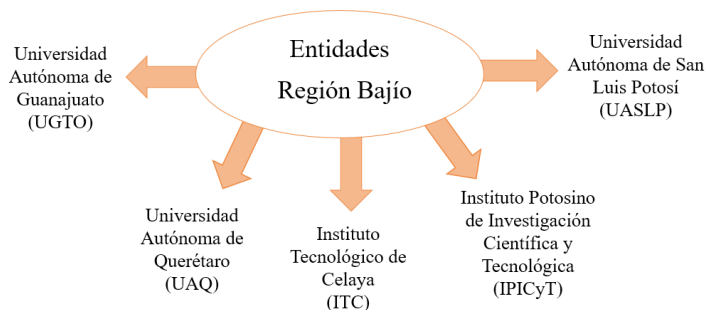


Figura 4. Entidades en las que se realiza catálisis de la Región Bajío.

dos por microondas, sistemas para síntesis fotoasistida de nanopartículas metálicas con lámparas LEDs a diferentes longitudes de onda y ultravioleta-visible (UV-vis). Destacan los estudios de medición de carbono orgánico total, espectroscopías infrarrojo (IR) y UV-vis *in situ* que son ofrecidos a diversas instituciones. Así como el acceso al Laboratorio Nacional de Luz Sincrotron de Brasil en el que se realizan experimentos de espectroscopía de absorción de rayos X (EXAFS, por sus siglas en inglés) y absorción de rayos X cercana al borde de absorción (XANES, por sus siglas en inglés). En esta zona hay 31 miembros afiliados y su representante es la Dra. Esthela Ramos Ramírez.

Región Norte

Esta área engloba los estados de Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas. Las entidades en las que se realiza catálisis o actividades relacionadas en estos estados son la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) y el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Las investigaciones de esta región se enfocan en la síntesis de óxidos metálicos, materiales mesoporosos tipos SBA-15 y zeolitas, todos ellos dopados con metales de transición como el Fe, Zn, Mn entre otros. Estos materiales se utilizan para oxidación catalítica de fenol y degradaciones fotocatalíticas de tricloroetileno o ácido salicílico, entre otros. Asimismo, se realiza catálisis homogénea aplicada a la síntesis de monómeros acrílicos y estirénicos, con y sin grupos polares, para la obtención de homopolímeros y copolímeros con estructuras bien definidas. Asimismo, se tiene amplia experiencia en la polimerización de olefinas con sistemas basados en zirconocenos (soportados, para trabajos en fase gaseosa, y no soportados) y polimerización de éteres vinílicos.² En esta región se cuenta con equipos de caracterización

² <<http://www.ciqa.mx/index.php/investigacion/80-sintesis-de-polimeros/42-proyectos-en-desarrollo-sp>>.

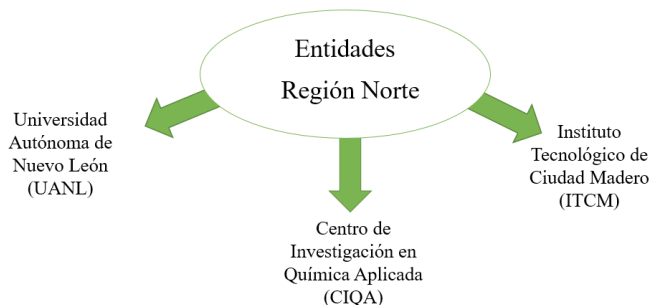


Figura 5. Entidades en las que se realiza catálisis de la Región Norte.

tales como XPS, HRTEM, microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) modelo Nescope 6000 (JEOL), espectroscopía FTIR y en especial acceso a resonancia magnética nuclear (NMR, por sus siglas en inglés) para sólidos en colaboración con las Universidades de The City University of New York y Clemson University, en Estados Unidos de América.

Se cuenta con diversos reactores por lotes y empacados, pero destaca un reactor solar de tipo captador parabólico compuesto (CPC). En esta región hay 22 miembros afiliados y su representante es el Dr. Javier Rivera de la Rosa.

Región Occidente

Incluye los estados de Michoacán, Jalisco y Colima. Sin embargo, las actividades de investigación en el área de catálisis en esta área son realizadas principalmente en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) en la Facultad de Ingeniería Química (FIQ). Gracias a los apoyos recibidos del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH, las actividades de in-

Figura 6. Entidades en las que se realiza catálisis de la Región Bajío.



vestigación fueron posibles y continúan siendo apoyadas en la actualidad. Esto se debe a que dicho instituto cuenta con infraestructura como los equipos de microscopía electrónica, difracción de rayos X, espectroscopía de infrarrojo. Asimismo, las líneas de investigación relacionadas con la catálisis en esta institución son fuentes alternas de energía, hidrotratamiento, degradación de contaminantes por medio de la fotocatalisis, reformación del metano tradicional y en seco, síntesis del amoníaco, uso de materiales naturales y de desecho como catalizadores, hidrogenaciones e isomerizaciones. Los tipos de materiales catalíticos usados son: metales, óxidos, sulfuros, fosfuros, nitruros y carburos metálicos, y de éstos se realiza la síntesis, caracterización y prueba de catalizadores en reacciones químicas, las cuales se llevan a cabo en diferentes tipos de reactores. Asimismo, se planea a futuro estudiar reacciones con biomasa para producción de biodiesel entre otras más, que pueden leerse en el capítulo concerniente a esta región. El representante en esta demarcación ante la ACAT es el Dr. José Luis Rico Cerda, y cuenta con 12 miembros afiliados.

Región Valle de México

Es donde se encuentra la mayor cantidad de instituciones con miembros de la ACAT, siendo alrededor de 50. Esta región comprende el estado de Hidalgo, el Estado de México y a la Ciudad de México. Las instituciones en las que se realiza catálisis son la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Instituto Politécnico Nacional (IPN) y la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) (véase la figura 7). Algunas de las instituciones mencionadas cuentan con diversas unidades, centros e institutos en los que se realiza investigación relacionada con

Figura 7. Entidades en las que se realiza catálisis de la Región Valle de México.



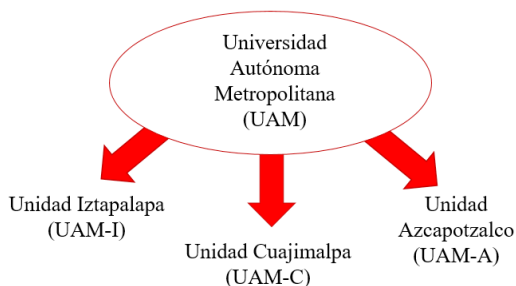


Figura 8. Unidades de la UAM en las que se realiza investigación en catálisis.

catálisis, por ejemplo, la UAM que tiene 3 unidades: la Unidad Azcapotzalco, la Unidad Cuajimalpa y la Unidad Iztapalapa (figura 8). A su vez, en la UNAM se realiza investigación y desarrollo en catálisis en el Instituto de Física (IF-UNAM), el Instituto de Química (IQ-UNAM), el Instituto de Ingeniería (II-UNAM), el Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM-UNAM), la Facultad de Química (FQ-UNAM) y el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET-UNAM) (figura 9). Por su parte, el IPN cuenta con la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE).

Esta región es muy compleja de describir pues es la que más instituciones agrupa. En general, hay proyectos relacionados con cada ámbito de la catálisis como la producción de nanocatalizadores para el control de la contaminación, síntesis y caracterización de materiales a base de nanopartículas para la producción fotocatalítica de H_2 , degradación de compuestos orgánicos volátiles, síntesis, formulación, caracterización y evaluación de catalizadores para hidrodesulfuración profunda de diésel y gasolina, síntesis y formulación de catalizadores para la desintegración catalítica fluida (FCC, por sus siglas en inglés), reformación e isomerización de gasolinas, síntesis y formulación de catalizadores para la producción de etileno, estudio de la estructura y propiedades catalíticas de nanopartículas con aplicación en medio am-

Figura 9. Instituciones de la UNAM en las que se realiza investigación en catálisis.



biente, energía y química fina, transformación y/o captura de CO₂, aminación reductiva asimétrica de cetonas, nanotubos de carbono y grafeno para la generación de H₂, aplicación de diferentes materiales catalíticos en reacciones con biomasa, entre muchos otros. Como es de esperarse en esta área, se cuenta con una gran variedad de equipos de caracterización y de evaluación catalítica tanto a nivel microrreacción como a nivel planta piloto, mismos que serán descritos a detalle en las contribuciones correspondientes.

La representante de esta región es la Dra. Martha Leticia Hernández Pichardo, y, además, la mayoría de los miembros del consejo directivo de la ACAT pertenecen también a esta región. La Dra. Julia Aguilar Priego de la UAM-A es su actual presidenta, el Dr. Rodolfo Zanella Specia del CCADET es el vicepresidente, las doctoras Dora Alicia Solís Casados y Reyna Natividad de la UAEM secretaria y vocal, respectivamente, y la Dra. Aída Gutiérrez Alejandre de FQ-UNAM es la tesorera. Asimismo, el Dr. José Antonio de los Reyes Heredia de la UAM-I es el actual presidente de la FISOCAT (Federación Iberoamericana de Sociedades de Catálisis).

Por último, cabe mencionar la existencia de algunas instituciones en las que se llevan a cabo actividades sobre catálisis como la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) o la Unidad de Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán (UER-CICY) mismas que están en proceso de formar parte de la ACAT como una nueva región.

Panorama de la investigación en catálisis en la Facultad de Química de la UNAM*

Aída Gutiérrez Alejandro**

RESUMEN: Se presenta un panorama de la investigación desarrollada en el área de catálisis en la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (FQ-UNAM). Primero se da una breve descripción de la conformación de la FQ y los diferentes programas de posgrado en los que participa y aquellos involucrados en catálisis, para luego pasar a las líneas de investigación y proyectos por departamento académico. Posteriormente, doy a conocer la infraestructura disponible, fuentes de financiamiento, colaboración y proyectos para concluir con los logros y perspectivas en el área de catálisis.

PALABRAS CLAVE: Facultad de Química, UNAM, catálisis, catalizadores, nanomateriales.

ABSTRACT: An overview of the catalysis research developed in the Faculty of Chemistry of the National Autonomous University of Mexico (Spanish acronym: FQ-UNAM) is presented. Brief descriptions of the Faculty organizational structure, postgraduate programs in which it participates and especially those related with catalysis are given as well as the research lines and projects by academic department. Subsequently the available infrastructure, financial support, collaboration and projects are presented to conclude with the achievements and perspectives in the catalysis field.

KEYWORDS: Faculty of Chemistry, UNAM, catalysis, catalysts, nanomaterials.

En 2016 se cumplió el primer centenario de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, fundada por Decreto presidencial del General Venustiano Carranza el 23 de septiembre de 1916 con el nombre de Escuela Nacional de Química Industrial, a partir de 1965 toma el nombre de Facultad de Química (FQ) encontrándose a la vanguardia de las instituciones académicas afines del país. En esta institución se ha formado a varias generaciones de profesionales de la química a nivel licenciatura y posgrado, 50,000 egresados, 700 alumnos de maestría y 300 con doctorado, egresados líderes que han contribuido en diversos ámbitos de la docencia, investigación e industria.

Recibido: 13 de febrero de 2017. Aceptado: 2 de marzo de 2017.

* Se agradece a la Dra. Itzel Guerrero Ríos por la información proporcionada para la escritura de este artículo.

** Unidad de Investigación en Catálisis, Depto. de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Colonia Copilco Coyoacán, C.P. 04510, Delegación Coyoacán. Cd. Mx., México. Tel: +52 (55) 5622 5255. Correspondencia: (aidag@unam.mx).

La misión de la FQ es “formar profesionales de excelencia con amplias capacidades en ciencia y tecnología químicas, comprometidos con aportar valor a la sociedad, en el marco del desarrollo sustentable del país” y su visión es “ser reconocida como la Facultad líder en la enseñanza de la Química por la formación de profesionales y la generación de conocimiento, nuevas tecnologías y patentes, con el propósito de contribuir en los planes de desarrollo del país”. En el cumplimiento de su misión, la labor académica que ha llevado a cabo la FQ le ha otorgado prestigio y reconocimiento internacional obteniendo premios internacionales como el Nobel de Química y el Príncipe de Asturias por egresados distinguidos.

La FQ está conformada por ocho edificios en la Ciudad de México (A, B, C, D, E, F, G y H), seis de ellos (A, B, C, D, E, F y H) ubicados dentro del campus universitario y un conjunto externo: Edificio G mejor conocido como la Antigua Escuela de Tacuba, ubicado en Mar del Norte núm. 5, Colonia San Álvaro Tacuba, en la Delegación Azcapotzalco, C.P. 09010 (figura 1). También se cuenta con una estación foránea, la Unidad de Química en Sisal Mérida, Yucatán.

La labor docente y de investigación se desarrolla en doce departamentos académicos: Alimentos y Biotecnología, Biología, Bioquímica, Farmacia, Física y Química Teórica, Fisicoquímica, Ingeniería Metalúrgica, Ingeniería Química, Matemáticas, Química Analítica, Química Inorgánica y Nuclear y Química Orgánica. Estos departamentos son atendidos por 1,110 académicos distribuidos así: 235 profesores de carrera de tiempo completo, 153 técnicos académicos y 722 profesores de asignatura.

Actualmente, se imparten 5 licenciaturas, todas acreditadas por organismos externos: química de alimentos, ingeniería química, ingeniería química metalúrgica, química y química farmacéutico biológica. A nivel licenciatura todas las carreras dentro de su mapa curricular en el tercer semestre, incluyen un curso de equilibrio y cinética donde se acerca al alumno a los conceptos de catálisis homogénea, heterogénea y enzimática. Solamente el plan de estudios de la carrera de ingeniería química ofrece un paquete terminal de materias optativas disciplinarias compuesto de 3 cursos: catálisis I, catálisis II y laboratorio de catálisis.

Posgrado e investigación

En los primeros 50 años del posgrado, celebrados en 2015, se ha consolidado una planta académica de primer nivel, ésta cuenta con 179 profesores adscritos al Sistema Nacional de Investigadores (SNI), de los cuales 11.2 % son candidatos, 47.5 % nivel I, 24% nivel II, y, 17.3% nivel III. Además de dos profesoras eméritas en el SNI. Durante estos años se ha fortalecido la interdisciplina y la interacción entre los programas que conforman su oferta académica y ha brindado una mayor opción de líneas de investigación de frontera, infraestructura y servicios de excelencia. También se han desarrollado alrededor de 600 tesis de licenciatura y posgrado en las diferentes líneas de investigación rela-



Figura 1. Fachada principal de los edificios que conforman la Facultad de Química-UNAM en la Ciudad de México. Imágenes: <www.quimica.unam.mx>.

cionadas con la catálisis, contribuyendo de manera importante a la formación de recursos humanos altamente especializados. La productividad en publicaciones internacionales registradas desde 1990 a la fecha de acuerdo con la base de datos Scopus es de 286 artículos.

La FQ participa en nueve programas de posgrado:

1. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas.
2. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Bioquímicas.

3. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Química).
4. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencia e Ingeniería de Materiales.
5. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias del Mar y Limnología.
6. Programa de Maestría y Doctorado en Investigación Clínica Experimental en Salud, campo Bioquímica Clínica.
7. Programa de Maestría en Docencia para la Educación Media Superior.
8. Programa en Ciencias de la Administración (Maestrías en Administración Industrial y en Alta Dirección).
9. Especialización en Bioquímica Clínica.

Los primeros seis programas de posgrado cuentan con el reconocimiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) formando parte del Programa Nacional de Posgrados de Calidad, pues cumplen con los más altos estándares de calidad y pertinencia. Lo posgrados relacionados con el área de catálisis son: maestría y doctorado en ingeniería (ingeniería química, disciplina catálisis, ingeniería de reacciones y biocatálisis), ciencias químicas, ciencia e ingeniería de materiales y ciencias bioquímicas.

Estos programas cuentan con diversas líneas de investigación como: hidrot ratamiento, desulfuración oxidativa, mejoramiento de crudos pesados, biocombustibles, desarrollo de procesos catalíticos, materiales nanoestructurados, catalizadores para celdas de combustible, catálisis enzimática, catálisis biomimética, desarrollo de procesos biocatalíticos y fotocatalíticos.

A continuación se presentan algunas líneas de investigación, por departamento académico, que se desarrollan en la FQ:

Departamento de Ingeniería Química

Unidad de Investigación en Catálisis (UNICAT)

- Síntesis, caracterización y evaluación de catalizadores para hidrodesulfuración profunda de diesel y gasolina. Dr. Jorge Ramírez Solís (jrs@unam.mx).
- Desarrollo de catalizadores para el proceso de Desulfuración Oxidativa (ODS) con el objeto de disminuir el contenido de azufre en combustibles fósiles. Dr. Luis Cedeño Caero (caero@unam.mx).
- Síntesis, caracterización y evaluación de materiales catalíticos para hidrot ratamiento. Materiales catalíticos con acidez controlada para la producción de etileno a partir de bioetanol como precursor en la producción de biodiesel y bioturbosina. Dra. Aída Gutiérrez Alejandre (aidag@unam.mx).
- Síntesis, caracterización y evaluación de materiales catalíticos para hidrodesulfuración. Caracterización espectroscópica de catalizadores mediante el estudio de propiedades electrónicas y análisis IR de

moléculas sonda adsorbidas. Dra. Perla Y. Castillo Villalón (perla@unam.mx).

- Desarrollo de catalizadores para el mejoramiento de crudos pesados. Dr. Rogelio Cuevas García (cuevas@unam.mx).
- Diseño y síntesis de materiales novedosos como catalizadores para la transformación y/o captura de CO₂ proveniente de biogás. Investigación en desarrollo por todos los integrantes de la UNICAT.

Laboratorio de nanocatálisis

- Síntesis y caracterización de materiales nanoestructurados y de nanopartículas soportadas para su aplicación en catálisis. Desarrollo de nuevos catalizadores para la hidrodesulfuración profunda de diesel e hidrogenación de aromáticos. Desarrollo de catalizadores selectivos para la hidrodesulfuración de gasolina. Desarrollo de nuevos catalizadores heterogéneos para la producción de biodiesel. Dra. Tatiana E. Klimova Berestneva (klimova@unam.mx).

Laboratorio de Desarrollo de Procesos Catalíticos

- Desarrollo de procesos catalíticos. El desarrollo de los procesos consta generalmente de las siguientes etapas: síntesis y establecimiento de método de preparación de catalizadores sólidos, establecimiento de condiciones de reacción catalítica y establecimiento de tamaño y forma del reactor idóneo al proceso de transformación. Dr. Martín Hernández Luna (martinhl@unam.mx).

Laboratorio de electroquímica

- Desarrollo de procesos de electrólisis. Diagnóstico de procesos de electrodeposición de cobre en la industria minera. Síntesis y evaluación de catalizadores para celdas de combustible de metanol. Síntesis y caracterización de polímeros electro-conductores. Dr Pedro Roquero Tejeda (roquero1@yahoo.com).

Departamento de Química Analítica

- Desarrollo de materiales electrocatalíticos para aplicaciones de celdas de combustible; oxidación de moléculas orgánicas y reducción de oxígeno. Evaluación en la celda de combustible. Dra. Ana Lilia Ocampo Flores (analof@gmail.com).

Departamento de Química Inorgánica y Nuclear

- Compuestos organometálicos para la activación de moléculas de interés en la industria (petrolera, textil y farmacéutica), lo cual habitualmente implica la activación de enlaces muy resistentes, entre los

que se destacan: C-C, C-H, C-S, C-N, C-Cl y C-F. Aplicación de compuestos organometálicos en síntesis orgánica y en la formación de nuevos materiales nanoestructurados. Estudio e implementación de sistemas catalíticos en medio homogéneo y supercrítico para la eliminación de contaminantes atmosféricos. Dr. Juventino García Alejandro (juvent@unam.mx).

- Diseño, síntesis y caracterización de compuestos de coordinación con metales de transición o lantánidos, buscando propiedades específicas, ya sean espectroscópicas (luminiscencia) o catalíticas como sistemas biomiméticos de enzimas. Dra. Silvia Castillo Blum (blum@unam.mx).
- Materiales nanoestructurados para la degradación de contaminantes. Dr. David Díaz (david@unam.mx).
- Desarrollo de “hidrolasas artificiales”, sus aspectos mecanísticos, nuevos enfoques biomiméticos y su actividad catalítica en la ruptura de ésteres y fosfoésteres incluyendo ADN y ARN y péptidos en disolución acuosa. Dr. Anatoly Yatsimirski (anatoli@unam.mx).
- Catálisis biomimética: se diseñan y caracterizan compuestos de coordinación de cobre, principalmente dinucleares, como catalizadores en reacciones de oxidación, en las que el oxidante es el oxígeno atmosférico. Dra. Laura Gasque (gasquel@unam.mx).
- Catálisis biomimética. Diseño, estudio y aplicaciones de compuestos de coordinación de metales de transición y lantánidos como modelos de metaloenzimas capaces de hidrolizar sustratos de interés biológico y ambiental. Dra. Paola Gómez Tagle Chávez (pao@unam.mx).
- Propiedades electrónicas de metaloproteínas, cinética y mecanismos de óxidorreducción y de sustitución. Tanto en sistemas biomiméticos como en metaloenzimas aisladas, específicamente con centros de hierro. Dra. Martha Sosa Torres (mest@unam.mx).
- Diseño y síntesis de compuestos de coordinación como modelos biomiméticos de metaloenzimas que permitan comprender el papel de sus sitios activos. Dra. Nora Barba Behrens (norah@unam.mx).

Laboratorio de Catálisis Materiales Avanzados y Nanotecnología (CATAMARAN)

- Implementación de materiales funcionales para captura y transformación de dióxido de carbono. Dentro de los materiales que se estudian actualmente se incluyen materiales híbridos de Clase 1 para captura de dióxido de carbono, conformados por un soporte inorgánico (sílice micro y mesoporosa) con polietilenimina (PEI) soportada con la capacidad de activar dióxido de carbono a carbamatos. Los carbamatos se transforman posteriormente empleando catalizadores homogéneos de alta abundancia (Fe, Co, Cu) y ligantes nitrogenados en reacciones de carboxilación y de transferencia de hidróge-

no para obtener moléculas con un alto interés comercial (ácidos carboxílicos, formiatos, carbonatos cíclicos, policarbonatos). Dra. Itzel Guerrero Ríos (itzelgr@unam.mx).

Departamento de Alimentos y Biotecnología

- Efectos ambientales en reacciones enzimáticas en medios no acuosos y fluidos comprimidos; desarrollo de procesos biocatalíticos; procesamiento de residuos industriales. Dr. Eduardo Bárzana García (ebg@unam.mx).
- Biocatálisis. Selección de microorganismos con actividades hidrolíticas de interés tecnológico. Inmovilización de enzimas para mejorar su estabilidad y resolver el problema ulterior de su eliminación del producto final. Dra. Carmina Montiel Pacheco (carmina@unam.mx).

Departamento de Química Orgánica

- Desarrollo de energías limpias. Diseño de sistemas sustentables basados en nanoestructuras de diversas morfologías y niveles (desde la nanoescala hasta la mesoescala) mediante el control de las interacciones intermoleculares (de corto o largo alcance) y el diseño molecular, y su correlación con las propiedades aprovechables en términos de funcionalidad. Dra. Martha V. Escárcega Bobadilla (mesbo@unam.mx).

Infraestructura

Un gran apoyo para el desarrollo de los proyectos de investigación que se llevan a cabo en la Facultad de Química es la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación e Industria (USAI), inaugurada en 1994, con el apoyo financiero del Programa UNAM-BID y el convenio firmado con el CONACYT. Inicialmente, se ubicó en el Edificio B y fue reubicada en 2015 con la inauguración del Edificio Mario Molina (Edificio H) donde actualmente ofrece servicios analíticos especializados de calidad. Esta unidad está certificada por el Instituto Mexicano de Normalización A.C. con la NMX-CC-9001-IMNC-2008, y también acreditada por parte de la Entidad Mexicana de Acreditación A.C. con la NMX-EC-17025-IMNC-2006 ISO/IEC 17025:2005.

Las técnicas analíticas a las que se tiene acceso en la USAI son:

- *Espectroscopía atómica*. Espectrofotómetro de absorción atómica SpectraAA 220 Marca Varian. Espectrómetro ICP-Ms Aurora M90, Marca Bruker. Espectrómetro de Emisión Atómica MP-AES 420, Marca Agilent. ICP-Ms Nexion 350, Marca Pekin Elmer.
- *Análisis elemental*. Analizador elemental Perkin Elmer 2400 para CHNS. Cistina como compuesto de calibración.

- *Análisis térmico*. DSC1 Mettler Toledo, con una precisión de $\pm 0,02$ °C, exactitud de ± 0.2 °C, intervalo de calentamiento de -150 a 700 °C. TGA4000 Perkin Elmer, con una precisión de $\pm 0,8$ °C, exactitud ± 1 °C, intervalo de calentamiento de temperatura ambiente a 1000 °C.
- *Análisis PDQuest*. El densitómetro calibrado GS-900 proporciona una calibración automática con gran precisión y puede digitalizar imágenes de alta calidad.
- *Cromatografía de líquidos-espectrometría de masas (sistemas acoplados HPLC/EM Y UPLC/EM)*. Cromatógrafo de líquidos de alta resolución modelo 1200 acoplado a un espectrómetro de masas triple cuadrupolo modelo 6410 ambos marca Agilent Technologies.
- *Difracción de rayos X de monocristal*. Difractómetro de rayos X de monocristal Oxford Gemini ($\lambda\text{MoK}\alpha = 0.71073$ o $\lambda\text{CuK}\alpha = 1.5418\text{\AA}$) con detector de área de 135 mm Atlas, equipado con un sistema criogénico Cryojet.
- *Difracción de rayos X de polvos*. Difractómetro de rayos X, Modelo D8 Advance Davinvi, configuración Theta theta marca Bruker AXS. Tubos de rayos X cerámicos de Cu y de Mo. Filtro de Ni para radiación de Cu y filtro de Zr para radiación de Mo. Tamaño mínimo de paso y avance mínimo de paso: $0,0001^\circ$. Velocidad de barrido en modo continuo: $0.001^\circ/\text{min}$ o menor.
- *Identificación de sustancias biológicas y bioquímicas por HPLC/DAD/ELSD*. Equipo de HPLC, Infinity 1260 de Agilent.
- *Electroforesis 1D y 2D*. Unidad de isoelectroenfoque Protean i12 IEF cell (BIO-RAD), para la focalización isoelectrica en tiras de 7 , 11 y 17 cm de diferentes rangos de pH, principalmente $3-10$ no lineal, $3-10$ lineal, $7-9$ lineal y $4-7$ lineal. Unidad de cámaras de electroforesis PROTEAN II xi Cell para correr geles de acrilamida de 7 , 11 y 17 cm.
- *Espectroscopía de IR, UV-visible*. Espectrofotómetro de FTIR/FIR Spectrum 400 de Perkin-Elmer, Rango: $4000-400\text{ cm}^{-1}$ y de $600-50\text{ cm}^{-1}$. Espectrofotómetro de FTIR Spectrum RXI de Perkin-Elmer. Rango: 4000 a 400 cm^{-1} . Espectrofotómetro de UV/visible modelo lambda 2, Perkin Elmer. Rango: $200-1100\text{ nm}$.
- *Espectrometría de masas (sistemas acoplados CG/EM)*. Espectrómetro de masas marca Thermo, modelo DFS (doble sector) con entrada para sonda directa y acoplado a cromatógrafo de gases marca Thermo, modelo Trace GC Ultra (columna capilar DB5). Espectrómetro de masas marca LECO, modelo Pegasus 4D con analizador másico TOF (tiempo de vuelo) y ionización electrónica, acoplado a cromatógrafo de gases marca Agilent, modelo 6890N.
- *Identificación de proteínas por huella peptídica*. Espectrómetro de masas modelo Synapt G2S, con tiempo de vuelo acoplado a un cromatógrafo de líquidos modelo nanoACQUITY, ambos marca Waters.
- *Microscopía confocal*. Microscopio Olympus FV1000. Láseres diodos:

405nm, 473nm, 559nm y 635nm. Espectro de emisión de 400-700nm.

- Microscopía electrónica (transmisión y barrido. Barrido: JEOL JSM-5900-LV. Resolución: 3.0 nm. Microanálisis (EDS): Oxford ISIS. Bajo vacío: 10 a 270 Pa. Transmisión: JEOL JEM-2010. Resolución: 0.23 nm-0.14 nm. Microanálisis (EDS): Oxford ISIS.
- *Microscopía óptica de campo claro y con fluorescencia.* Microscopio vertical Olympus BX51. Microscopio estereoscópico Olympus SZX7.
- *Resonancia magnética nuclear.* Espectrómetro de RMN de 9.4 T Marca Varian Modelo VNMR5. Sonda Broad Band para RMN de sólidos (4mm). Espectrómetro de RMN de 9.4 T Marca Varian Modelo MR.
- *Resonancia paramagnética electrónica.* Espectrómetro de RPE Elexsys E500 (Bruker).
- *Tamaño de partícula por difracción láser.* Analizador Mastersizer 2000, Malvern Instruments, equipado con un módulo de dispersión Hydro (2000MU, 2000S) y vía seca (Scirocco 2000).

Además del apoyo en técnicas de análisis especializados (figura 2), los diferentes laboratorios que realizan actividades en catálisis cuentan con la infraestructura necesaria para la síntesis de catalizadores como rotavapores, estufas, balanzas, muflas, bombas rotativas y de membrana. Para las pruebas catalíticas se tienen sistemas de reacción a presión atmosférica y a alta presión en sistemas continuos y discontinuos (reactores Parr), autoclaves para reacciones solvotermal, baños enfriadores con recirculación, cromatógrafos

FIGURA 2. Equipos especializados que se encuentran en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación e Industria (USAI).



de gases y/o líquidos para análisis de productos de reacción, espectrómetros de masas para identificación de productos. Algunos de los grupos de investigación también tienen a su disposición equipos de fisisorción de nitrógeno para determinación de propiedades texturales e infraestructura para caracterización de materiales por espectroscopías de UV-vis, FT-IR y ATR. Líneas de alto vacío para estudios de superficies en atmósfera controlada. Se tiene acceso a todas las bibliotecas especializadas de la UNAM y al servicio por red de búsquedas bibliográficas internacionales. Se cuenta con el personal técnico de apoyo necesario, además de talleres de soplado de vidrio, talleres mecánicos y electrónicos.

Financiamiento, colaboraciones y proyectos

El fortalecimiento y consolidación de la investigación en catálisis en la FQ se ha logrado a través del apoyo financiero institucional, de diferentes organismos gubernamentales y de la vinculación con la industria. Cabe también destacar los convenios de colaboración de los investigadores con diferentes grupos tanto a nivel nacional como internacional. A continuación se hará un resumen de colaboración y apoyo financiero en los últimos años.

Apoyo financiero

Programas institucionales: Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación (PAIP) proveniente de recursos extraordinarios de la FQ; Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico en la UNAM (DGAPA-UNAM).

Programas de organismos gubernamentales e industria: Los recursos financieros mayoritariamente se han obtenido del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a través de sus diversas convocatorias, Secretaría de Energía, Petróleos Mexicanos, Unión Europea, Consejo Regulador del Tequila, Secretaría de Relaciones Exteriores de México y el Ministero degli Affari Esteri (Italia), Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España (CSIC), Centre National de la Recherche Scientifique (Francia), entre otros.

Colaboración

Colaboración con otras dependencias de la UNAM: Instituto de Química, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), Instituto de Investigación en Materiales, Instituto de Biotecnología, Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Instituto de Física, Instituto de Ingeniería, Facultad de Ingeniería e Instituto de Energías Renovables.

Colaboración con instituciones de educación superior y centros de investigación nacionales: Instituto Mexicano del Petróleo, Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. (CICY), Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV, ESIQIE y CICATA), Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Universi-

dad Autónoma del Estado de México(UAEM), Universidad de Guanajuato, Universidad Autónoma Metropolitana, Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares e Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. (IPICYT).

Colaboración con Instituciones de Educación Superior y Centros de Investigación en el extranjero: CNRS-Francia, Institut Natioanal Polytechnique de Toulouse (INPT), CSIC-España, CNR-Italia, Instituto Venezolano de Investigación Científica (IVIC), Università degli Studi di Genova, Università Rovira i Virgili, Università degli Studi di Roma La Sapienza, Universidad de Castilla La Mancha, Imperial College, Universidad Complutense en Madrid, Universidad Nacional de la Plata en Argentina.

Logros y perspectivas

Desde la conformación del primer laboratorio de investigación en catálisis heterogénea en 1971 en el Departamento de Ingeniería Química de la FQ-UNAM, los logros en este campo de investigación en los diferentes departamentos académicos que conforman la FQ han sido muchos y muy satisfactorios. Éstos se han reflejado en la formación de recursos humanos altamente especializados, artículos científicos publicados en revistas indizadas de reconocido prestigio internacional y en el número de citas recibidas, artículos de divulgación, libros y desarrollos tecnológicos con registro de propiedad intelectual. Aunado a lo anterior, la labor de investigación realizada en el área de catálisis también ha sido reconocida por diversas instituciones. A continuación se mencionan algunos de los premios y reconocimientos obtenidos en las últimas décadas otorgados a académicos con líneas de investigación en el área de catálisis:

- Gobierno de la República. Premio de Ciencias y Artes en el área de Tecnología y Diseño, en 2004.
- UNAM. Reconocimiento Distinción Universidad Nacional para Jóvenes Académicos (RDUNJA), en los años 2000, 2003 y 2009. Premio Universidad Nacional (PUN), en 2001, 2003, 2014 y 2016.
- CONACYT, a través del Sistema Nacional de Investigadores del que forman parte los académicos en sus diferentes niveles.
- Academia Mexicana de Ciencias. Premio de Becas para Mujeres en la Ciencia otorgado por L'Oréal-UNESCO-CONACYT-AMC.
- Sociedad Química de México. Premio Nacional de Química Andrés Manuel del Río (1996, 2002, 2010 y 2013).
- Premio BASF-UDLAP en Química Sustentable, 2012.

En cuanto al registro de propiedad intelectual se cuenta con patentes ya sean registradas por la Universidad Nacional Autónoma de México y/o en colaboración con el Instituto Mexicano del Petróleo ante el Instituto Mexi-

cano de la Propiedad Industrial (IMPI), en la Oficina de Patentes de los Estados Unidos, en la Oficina de Patentes Europea (EPO) y en la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (WIPO). A continuación se enlistan algunas de las patentes registradas:

- *Procedimiento de obtención de una formulación catalítica para la producción de diésel de ultrabajo azufre, el producto obtenido y su aplicación.* (2014) Solicitud Expediente MX/a/2014/007510. Folio: MX/E/2014/043373 IMP-UNAM. Solicitud de Patente Internacional. US Patent and Trademark Office. IMP-UNAM. (2016) No. US2016/000 8792 A1.
- *Method of enzymatic treatment of a solid lignocellulosic material.* Francia: Institut National Polytechnique de Toulouse, Universidad Nacional Autónoma de México. (2015) United States Patent and Trademark Office Pre-Granted Publication. Número de patente US 20150299751.
- *Mesoporous composite of molecular sieves for hydrocracking of heavy crude oils and residues.* Solicitud (2014) US20140124410 A1. Instituto Mexicano del Petróleo.
- *Devulcanización catalítica de residuos de neumáticos usados.* Registro en trámite por la UNAM. (2013) Número de la solicitud MX/a/2013/009896.
- *Bis-salphen compounds and carbonaceous material composites comprising them.* Solicitud (2013) EP20130382322, No. de publicación: EP2835375 A1. Fundació Institut Català d'Investigació Química, Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats, Polymaterials.
- *Procédé de traitement enzymatique d'une matière ligno-cellulosique solide.* Número de publicación internacional: WO 2013/182827 A1. Francia: Institut National Polytechnique de Toulouse, Universidad Nacional Autónoma de México.
- *Formación de imidazoles a partir de benzonitrilos.* Registro en trámite por la UNAM. (2012). Número de la solicitud MX/a/2012/005313.
- *Composito mesoporoso de mallas moleculares para la hidrodesintegración de crudos pesados y residuos.* Solicitud (2012) Instituto Mexicano del Petróleo MX/a/2012/012877.
- *Catalysts, its preparation and use for hydrodesulfurization of residua and heavy crudes.* US7968069 B2. Concedida (2011). Instituto Mexicano del Petróleo.
- *Catalyst for the hydrodesulfurization of residua and heavy crudes.* Solicitud de patente (2011) Instituto Mexicano del Petróleo. US2011 0218097 A1.
- *Procedimiento para la remoción de compuestos aromáticos policíclicos azufrados presentes en el petróleo crudo o sus destilados,* Universidad Nacional Autónoma de México (2011) No. Patente: 284270, México.

- *Catalizador para deshidrogenación de hidrocarburos ligeros y su proceso de fabricación.* Registro en trámite por la UNAM. Número de la solicitud de patente en México (2010): MX/a/2010/006078.
- *Proceso de deshidrogenación catalítica de hidrocarburos ligeros sobre catalizadores a base de carbón activado.* Registro en trámite por la UNAM. Número de la solicitud de patente en México: MX/a/2010/006080.
- *Proceso para la dimerización de hidrocarburos olefinicos ligeros en presencia de catalizadores sólidos ácidos.* Registro en trámite por la UNAM (2010). Número de la solicitud de patente en México: MX/a/2010/006079.
- *Proceso para la activación de catalizadores industriales utilizados en los procesos de hidrotratamiento, y su reutilización en la oxidesulfuración de compuestos organoazufrados.* Universidad Nacional Autónoma de México. (2007) Número de solicitud MX/a/2007001725.
- *Polimerización radicalaria en presencia de compuestos cíclicos azufrados.* Registro en trámite Universidad Nacional Autónoma de México y Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico S.A. de C.V. MX/a/2007/010558. Fecha de Publicación: marzo de 2009.

El gran interés por el desarrollo de proyectos de investigación básica y de aplicación industrial orientados a temas prioritarios de nuestro país y a nivel mundial, así como la preocupación por la generación de conocimiento ha llevado a los diferentes grupos de investigación en catálisis de la FQ a apoyar la formación de recursos humanos especializados en esta área, tanto a nivel licenciatura como de posgrado. Al mismo tiempo se ha hecho un esfuerzo importante para lograr una infraestructura experimental de primer nivel e incorporar en los últimos tres años a nuevos académicos dentro del Subprograma de Incorporación de Jóvenes Académicos de Carrera (SIJA) en la UNAM para reforzar las áreas del conocimiento existentes y atender las áreas o necesidades emergentes, de conformidad con el plan de desarrollo de la Facultad de Química. Algunas de estas áreas emergentes son: fuentes alternas de energía a partir de recursos renovables, nuevos materiales, catalizadores altamente selectivos para la eliminación de contaminantes presentes en cortes pesados provenientes de la destilación del petróleo o para el tratamiento de crudo pesado, catalizadores para procesos petroquímicos, para nanotecnología y química verde.

Uno de los grandes retos es lograr que se realice mayor investigación interdisciplinaria y multidisciplinaria entre los grupos de investigación como elemento fundamental para generar conocimiento con un enfoque de aplicación a corto, mediano y largo plazo lo que permitirá desarrollar y/o vincular un mayor número de proyectos con la industria de manera más eficiente.

Sitios de interés

- <www.quimica.unam.mx>
- <<http://www.usaii-fqunam.mx/>>
- <<http://dgapa.unam.mx/index.php/impulso-a-la-investigacion/papiit>>
- Registro de tesis en la UNAM:
<<http://tesis.unam.mx/F>>
- Patentes:
<<http://www.wipo.int/portal/en/index.html>>
<<http://www.gob.mx/impi>, <https://www.uspto.gov/patent>>
- Scopus base de datos, Elsevier.
Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación:
<<http://www.usaii-fqunam.mx/>>

Bibliografía

- Garritz Ruiz, A. Mateos Gómez J. L., (2015). *50 años de investigación y posgrado en la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México*. México: UNAM. p 29, 39, 71,121.
- Garritz Ruiz, A. Mateos Gómez J. L., (2015). *Historia de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, su primer siglo: 1916-2016*. México: UNAM, ISBN 978-607-02-7382-7. 19, 245, 278.
- Hernández Luna, M. (2004). Primer Laboratorio de Catálisis en la Universidad Nacional Autónoma de México. J. M. Domínguez Esquivel Coordinador (ed.), *El Amanecer de la Catálisis en Iberoamérica*. ISBN 968-489-017-6 (IMP) 84-96023-25-7 (Cyted) México. 198-205.
- Informe Anual de Actividades*. (2015). Jorge Manuel Vázquez Ramos, director FQ-UNAM.

Instituto de Química de la UNAM: catalizando la química con paso firme

Tomás Guerrero,* José G. López-Cortés*

RESUMEN: El Instituto de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (IQ-UNAM), a sus 75 años de existencia, se ha forjado como una institución sólida y de prestigio internacional. Recientemente, una de las líneas de investigación con mayor impacto en el IQ-UNAM, por su trascendencia en todas las áreas de la química, es la catálisis. En el IQ se cuenta con la infraestructura necesaria para llevar a cabo investigación básica y aplicada en el área de la catálisis homogénea. La participación de la institución en diversos programas de posgrado permite la generación de productos de investigación, proyectos en colaboración con la industria, la generación de conocimiento indispensable para la química y para nuestro país, así como la formación de recursos humanos de alta calidad. Dentro del IQ, un nutrido grupo de investigadores exploran y enriquecen líneas sobre catálisis mediada por metales de transición, el diseño de ligantes y auxiliares quirales, y organocatálisis. La capacidad de vinculación que ofrece el IQ con otras instituciones a nivel mundial lo convierten en la punta de lanza para nuevos descubrimientos en catálisis, transformándolo en uno de los mejores sitios en el mundo para desarrollar esta área de la química.

PALABRAS CLAVE: IQ-UNAM, catálisis, organocatálisis, ligantes, metales de transición.

ABSTRACT: The Institute of Chemistry of the National Autonomous University of Mexico (Spanish acronym: IQ-UNAM), at his 75th anniversary is known around the world as an important and solid institution. Catalysis is outlined as a very strong research field because of their importance in every area of applied chemistry. The development and understanding of several catalytic systems are encouraged among several researchers. IQ is fully equipped with cutting edge technology suitable for basic and applied research in catalysis and related fields. This capability and the strong presence in several graduate programs have an impact in the number of high quality publications, strong collaboration with industry, development of chemistry and high quality of human resources. A strong group of researchers explores and develop transition metal mediated process, design of chiral ligands and organocatalysis. The strong relations with other institutions worldwide makes the IQ the tip of the sword to achieve new discoveries in catalysis and one of the best places in the world to make chemistry.

KEYWORDS: IQ-UNAM, catalysis, organocatalysis, binders, transition metals.

Introducción

El Instituto de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (figura 1) fue inaugurado el 5 de abril de 1941 en las instalaciones de Tacuba de la

Recibido: 23 de enero de 2017. Aceptado: 25 de marzo de 2017.

*Instituto de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito exterior, Ciudad Universitaria, C.P. 04360, Cd. Mx., México.

Correspondencia: (jglcvdw@unam.mx); Fax: +52 55 56162203; Tel: +52 55 56224513.



FIGURA 1. Instalaciones del Instituto de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 2017.

antigua Escuela Nacional de Ciencias Químicas y forma parte del Subsistema de la Investigación Científica. Su misión inicial fue organizar la investigación científica en el campo de la química en México con la finalidad de institucionalizarla, de tal manera el instituto generó el nombramiento de Investigador de Tiempo Completo siendo Alberto Sandoval y Fernando Orozco los primeros académicos en obtenerlo (figura 2).

Así el instituto participó de momentos clave en el desarrollo de la industria química del país, y en los primeros momentos de la expropiación petrolera que coinciden con su fundación, se desarrolló la síntesis industrial del tetraetilo de plomo, lo cual permitió la comercialización de las gasolinas en México; posteriormente los estudios de la alcalinidad del lago de Texcoco llevaron a la fundación de la empresa Sosa Texcoco.

Un investigador del instituto, Luis E. Miramontes se dedicó a la síntesis y caracterización de compuestos esteroidales con actividad biológica [1], esta línea de investigación generó un fuerte vínculo con la empresa Syntex, dando origen a un intenso periodo de investigación en el área de la química medicinal, culminando con la síntesis del primer anticonceptivo oral, compuesto esteroideal que revolucionó a la sociedad a nivel mundial.

En sus inicios, el IQ se caracterizó por el estudio de productos naturales, entre otros logros, se puede citar el aislamiento y caracterización de

los primeros sesterterpenos [2], el estudio de los mecanismos de reacción dienona-fenol, así como el aislamiento y caracterización de la biodiversidad estructural que llevaron al instituto a ser líder mundial en el estudio de lactonas sesquiterpénicas. Siendo referente de vanguardia tecnológica en la elucidación estructural de compuestos químicos, es el lugar donde se adquiere el primer espectrómetro de resonancia magnética nuclear y el primer difractómetro de rayos X del país, con el tiempo el IQ se vuelve sede del laboratorio nacional de macromoléculas, logrando la obtención de la primera estructura en estado sólido de una proteína en Latinoamérica, la heveína [3].

Al día de hoy, el Instituto de Química cuenta con liderazgos científicos bien establecidos, distribuidos en todos sus departamentos académicos que abarcan todas las áreas de la química. Cuenta con los Departamentos de Productos Naturales y de Química Orgánica que son, por excelencia, departamentos fundadores de la institución así como con un Departamento de Química Inorgánica, sólido y con una visión amplia de las necesidades tecnológicas y los retos que en materia de química, catálisis y procesos deben ser resueltos en los años por venir.

Para dar respuesta a estos retos, el IQ tiene 105 miembros de su personal académico, distribuido entre investigadores y técnicos académicos, cada uno en las diferentes categorías y niveles tanto en el Programa de Primas al Desempeño del Personal Académico de Tiempo Completo (PRIDE) como del Sis-

FIGURA 2. Primeros investigadores con nombramiento en el IQ. Izquierda: Dr. Fernando Orozco, primer director del Instituto de Química; derecha: Dr. Alberto Sandoval Landazúri, primer estudiante mexicano en recibir el grado de doctor en esta institución.



tema Nacional de Investigadores (SNI), por ejemplo, basta recalcar que el 42% del personal académico posee la distinción de investigador nacional en los niveles II y III que confiere el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), lo que muestra la excelente calidad de la investigación que se realiza en el instituto [4].

Infraestructura

Para el correcto desarrollo de sus funciones y en aras de garantizar una investigación de alta calidad el instituto cuenta con el más sofisticado equipamiento: equipo para pruebas biológicas completamente automatizado, un nuevo equipo de difracción de rayos X, microscopio de FT-IR, IR, polarimetría, UV-vis y fluorescencia; los servicios analíticos del Instituto de Química se encuentran certificados de acuerdo con la norma ISO 9001:2008 por el Instituto Mexicano de Normalización y Certificación.

Específicamente para el área de catálisis, el IQ cuenta con un laboratorio completo de cromatografía, tanto de gases, como de líquidos, también es factible acoplar esos sistemas a espectrometría de masas, lo que permite la separación, identificación y cuantificación de mezclas complejas (figura 3).

FIGURA 3. Equipos del laboratorio de cromatografía del IQ, a la izquierda se observa un equipo de HPLC acoplado a UV-Vis, a la derecha, un equipo Agilent 1200 acoplado a un espectrómetro de masas.





FIGURA 4. Del lado izquierdo se puede observar un reactor equipado para polimerización de etileno. A la derecha se observan dos reactores Parr para alta presión, lo que permite el estudio de reacciones de hidrogenación, carbonilación, etc. Ambos sistemas permiten el análisis y puesta a punto de las más diversas técnicas catalíticas.

Para ese mismo fin, también se cuenta con reactores para polimerización de etileno, reactores Parr de alta presión y sistemas diseñados para realizar hasta 6 reacciones de manera simultánea (figura 4), sistemas de reacción de microondas que pueden trabajar a temperatura y presión controlada (figura 5), equipos de IR y tecnología de punta en el

FIGURA 5. Horno de microondas, equipo que se utiliza para llevar a cabo reacciones con esta fuente de energía, lo que se traduce en tiempos más cortos de reacción y condiciones de química verde, este equipo soporta altas presiones y control de temperatura.





FIGURA 6. Equipo de resonancia magnética nuclear de 700 MHz equipado con un automuestreador con capacidad mayor a las 500 muestras y con una criosonda de tres canales enfriada por helio líquido.

área de resonancia magnética nuclear (300, 400, 500 y 700 MHz) (figura 6), uno de estos equipos de 300 MHz se encuentra a disposición del personal del departamento de química inorgánica lo que resulta sumamente conveniente para monitorear el curso de las reacciones catalíticas. Toda esta infraestructura, junto con el enorme capital humano constituye una institución sólida y robusta con los recursos para generar investigación original y relevante en el área de catálisis homogénea.

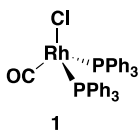
Catálisis en el Instituto de Química

La catálisis en el IQ quizá no sea tan antigua como el área de productos naturales y química orgánica, no obstante, ha sido un área que ha crecido de manera muy importante durante las últimas cuatro décadas. A continuación, se describirán algunas de las aportaciones que dieron origen a este campo de investigación en nuestro instituto. Para hablar de los orígenes

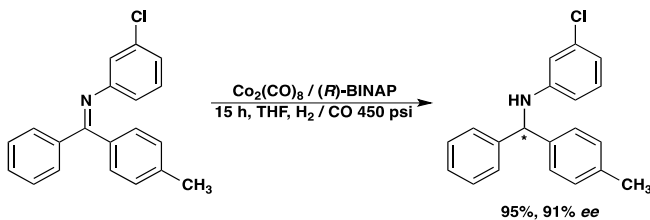
de la investigación en el área de la catálisis, es indispensable abordar el trabajo del Dr. Jacobo Gómez Lara, quien inició formalmente sus labores en el instituto en 1963 [5] como investigador de tiempo completo. Entre otras investigaciones, el Dr. Gómez se destacó por su interés en el área de la química inorgánica que pronto se convirtió en la primera línea de investigación en el área de catálisis, con el tiempo, junto con dos alumnos suyos de posgrado, los Dres. Cecilio Álvarez y Armando Cabrera se desarrollaría la escuela de catálisis del IQ.

El primer trabajo y quizá el más importante de esa época se publicó en 1977, en esta publicación los autores estudiaron el proceso de hidroformilación catalítica del etileno en fase homogénea mediada por un compuesto organometálico de rodio (I) (**1**) [6], este trabajo les confiere un importante premio otorgado por la empresa Celanese Mexicana [5], con esto es justo afirmar que inicia la investigación en el área de catálisis en el IQ de la UNAM. Con el tiempo, el Dr. Gómez Lara dedicaría su vida a realizar contribuciones originales en la aplicación de compuestos de coordinación de rodio en los

más diversos campos de la catálisis, entre otras cosas se pueden citar sus estudios sobre los efectos electrónicos y estéricos sobre el mecanismo de reacción de la decarbonilación de halogenuros de acilo mediadas por compuestos de carbonil rodio [7], y la producción de hidrógeno en medio acuoso mediante complejos catiónicos de rodio [8].

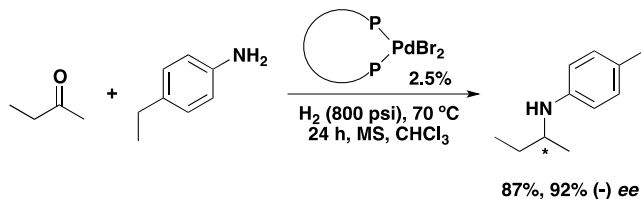


Con el paso del tiempo, el Dr. Cabrera fue realizando importantes contribuciones a la catálisis en México; cabe destacar su amplia labor en cuanto a procesos catalizados por cobalto, también estudió, entre otras líneas, la isomerización selectiva de epóxidos catalizada por un compuesto de coordinación de estaño de identidad $\text{Sn}[\text{Co}(\text{CO})_4]_4$; [9]. Más tarde, en 2013, el grupo de investigación publicó el primer ejemplo de hidrogenación asimétrica de iminas con un sistema catalítico conformado por el dímero de tetracarbonilo de cobalto en presencia de un ligante quirral como director de la estereoselectividad de la reacción (esquema 1), [10], este tipo de procesos resultan muy atractivos para la química medicinal y la industria farmacéutica.



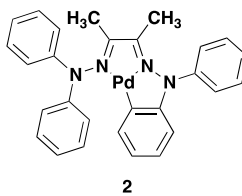
ESQUEMA 1. Primer ejemplo de hidrogenación asimétrica de iminas mediado por cobalto.

Utilizando ese mismo precursor metálico, el grupo del Dr. Cabrera estudió algunos otros procesos catalíticos, por ejemplo, la hidroformilación e hidroxialquilcarbonilación de 3,4-dihidro[2H]piranos catalizada en condiciones syngas [11]. Desde luego, en la vida de un académico tan interesado en la catálisis también se pueden encontrar otras colaboraciones con otros metales de transición, al respecto resaltan sus contribuciones sobre la carbonilación de α -cetoalquinos mediada por níquel [12] y una excelente contribución para una reacción de aminación reductiva asimétrica de cetonas en un paso mediante el uso de un catalizador quirral de paladio (esquema 2) [13].



ESQUEMA 2. Aminación reductiva asimétrica de cetonas catalizada por un complejo quiral de paladio.

En el mismo terreno, el Dr. Cecilio Álvarez continuó realizando importantes colaboraciones en el área, por caso, en 2005, publicó un trabajo acerca de paladaciclos y su aplicación en la polimerización de etileno [14], en dicha publicación, los autores describieron la síntesis de un nuevo tipo de paladaciclos (**2**) y estudiaron su actividad catalítica para la síntesis de polietileno.



Así pues, a partir del trabajo de estos dos investigadores y la consolidación de sus grupos de trabajo se ha constituido la investigación en el área de catálisis como la conocemos hoy día en el IQ, en ese contexto las líneas de investigación en el área son: catálisis mediada por metales de transición, diseño y estudio de ligantes para catálisis y organocatálisis.

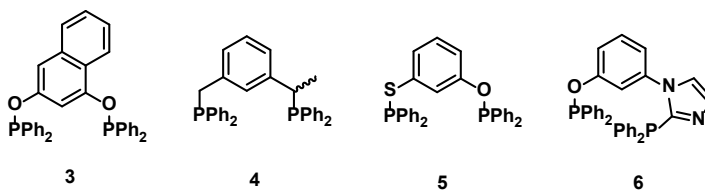
En general, es justo afirmar que, salvo el caso de la organocatálisis, el diseño de ligantes va de la mano con el uso del metal de transición, de manera que a continuación se describe primordialmente, la contribución que varios investigadores realizan en estas áreas de la investigación y desarrollo de sistemas catalíticos para reacciones de importancia en la química básica y aplicada.

Desde el punto de vista histórico, el uso de fosfinas como ligantes [15, 16] en reacciones catalizadas por metales de transición ha sido tan estudiado como los metales de transición en sí. Si se realizara una búsqueda en bases de datos, no sería difícil demostrar al lector que existe un número inmenso de trabajos que describen el uso de paladio, rodio, iridio, níquel, hierro, cobalto, cobre, etc., como el fragmento metálico del catalizador [17], por lo que partiremos de una breve discusión sobre la investigación que realizamos en el IQ sobre el diseño y evaluación de la actividad catalítica del binomio metal-ligante.

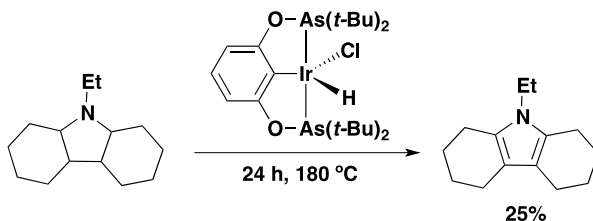
Con respecto a los ligantes, la versatilidad de las fosfinas y su amplia aplicabilidad en procesos catalíticos contrasta con su relativa fragilidad ante la presencia de agentes oxidantes, la humedad e incluso el medio ambiente,

es por esta razón que una de las áreas de investigación más exploradas consiste en el diseño y desarrollo de mejores fosfinas y nuevos ligantes con y sin fósforo y con otros átomos donadores que, dependiendo de la aplicación puedan mostrar una mejora en los sistemas catalíticos actuales. En este sentido, un grupo que realiza una labor muy importante es el del Dr. David Morales, dentro de sus intereses se encuentra el desarrollo y optimización de ligantes tipo pinza [18].

Los ligantes tipo pinza constituyen una alternativa altamente rentable de estructuras polidentadas, rígidas y muy robustas. Este tipo de estructuras, debido a su versatilidad estructural, pueden ser tanto simétricas como asimétricas e incluso con centros estereogénicos (**3-6**) [19], lo que permite modular efectos estéricos y electrónicos que a la larga son los responsables de la actividad catalítica de un compuesto de coordinación.



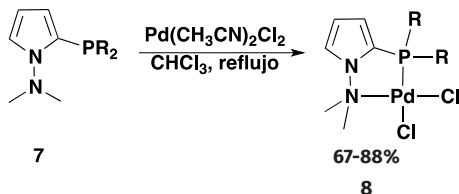
Este tipo de ligantes se aplican a la investigación en los campos de la hidrogenación asimétrica, polimerización y reacciones de acoplamiento cruzado tipo Heck y Suzuki-Miyaura [19]. Al respecto, el grupo del doctor Morales ha estudiado y desarrollado la química de este tipo de ligantes, no sólo con paladio como metal sino con rutenio [19], níquel [20] e iridio [21]. En el esquema 3 se presenta la aplicación de un complejo tipo pinza de iridio con átomos de arsénico como donadores y la aplicación a reacciones de dehidrogenación catalítica.



ESQUEMA 3. Dehidrogenación catalítica mediada por un catalizador de iridio con ligantes tipo pinza.

Un paso más en el desarrollo de sistemas derivados de fosfinas ha sido el diseño de ligantes fósforo-nitrógeno basados en el núcleo de pirrol. Aprovechando nuestra experiencia en las reacciones de litiación de compuestos heterocíclicos, se realizó la síntesis de diversas fosfinas derivadas de pirroles

(7) y con estos ligantes fue explorada la síntesis de los complejos de paladio correspondientes (8) (esquema 4), la actividad catalítica de estos complejos fue evaluada en reacciones de acoplamiento tipo Heck y, en vista de su buen desempeño, fueron utilizados en el paso clave de una reacción de acoplamiento intramolecular para completar la síntesis de un producto natural, la Arnotina I [22], el éxito del proceso evidenció la excelente actividad de este tipo de compuestos.

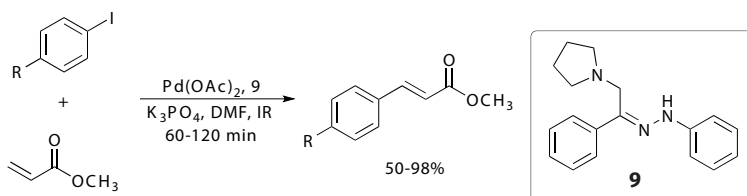


ESQUEMA 4. Síntesis de los complejos 8 a partir de fosfinas derivadas de pirrol.

Animados por la síntesis de ese compuesto natural, se exploró la capacidad de estos sistemas para generar un método eficiente para las reacciones de ciclación intramoleculares mediante acoplamientos C-C, con lo que nuestro grupo de investigación desarrolló un método catalítico en condiciones suaves para la síntesis de dibenzo- α -pironas y las lactamas análogas [23].

Con respecto al desarrollo y aplicación de ligantes libres de fosfina, nuestro grupo de investigación ha explorado la síntesis de ligantes con diferentes esqueletos; en 2015, se describió la síntesis de una familia completa de ligantes nitrogenados (9) a partir de una reacción de Mannich sobre las correspondientes fenilhidracinas, dichos ligantes fueron evaluados en la reacción de Heck (esquema 5) [24]. Un aspecto de particular importancia es que este trabajo permitió explorar, además de la naturaleza del ligante, la activación mediante otra fuente de energía, es de particular importancia mencionar que, tanto la reacción de Mannich como la reacción de acoplamiento tipo Heck fueron promovidas irradiando las mezclas de reacción en la longitud de onda del IR, este tipo de procesos son particularmente importantes por entrar completamente dentro de lo que se conoce como química verde.

ESQUEMA 5. Reacción de Heck catalizada por paladio e irradiación IR.



Continuando con el diseño de sistemas catalíticos, una de las aportaciones más relevantes de nuestro grupo consiste en el diseño de ligandos para reacciones de sustitución alílica y de Heck, en esta contribución se hace uso de nuestra experiencia en la síntesis de carbenos de Fischer a partir de ferroceno [25] sintetizando ferroceniltiazolinas (**10**) como grupos directores para la orto-litiación de ferroceno. Estos grupos fueron utilizados para agregar varios reactivos electrofílicos derivados de calcógenos, tras esta reacción fue posible la obtención de varios ligandos bidentados (**11**, **12**) que dieron excelentes resultados en las reacciones de Heck y sustitución alílica asimétricas [26]. Este tipo de ligandos ocupan un lugar sin precedente en el área de la catálisis, demostrando que es posible la sustitución con fragmento fosfina por un sulfuro y pudiendo realizar diferentes procesos catalíticos en presencia de humedad y oxígeno en condiciones suaves de reacción (figura 7).

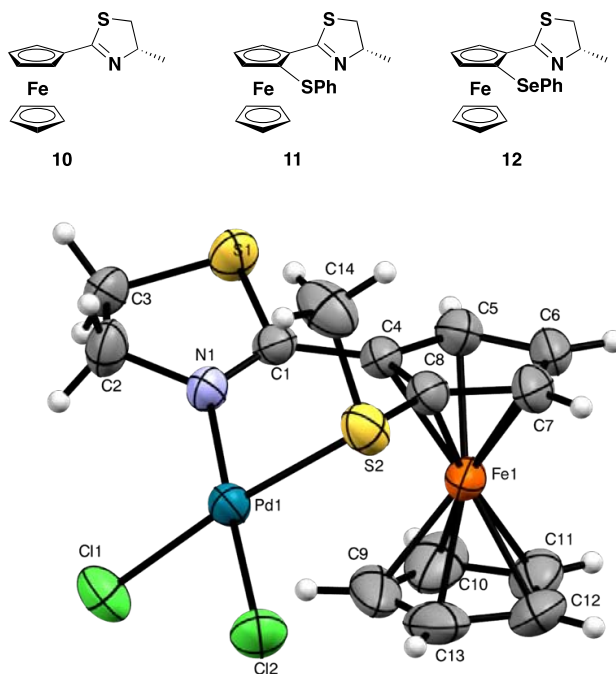
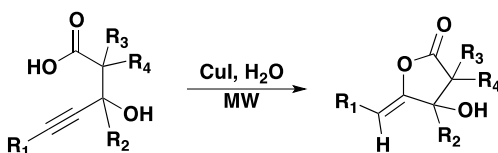


FIGURA 7. Diagrama ORTEP para un complejo de paladio utilizado para reacciones de Heck catalizadas por paladio, los elipsoides se muestran al 30% de probabilidad.

Los estudios en esta área dieron lugar a una patente [27] y ha abierto una línea de investigación completamente nueva para generar catalizadores para los más diversos procesos catalíticos, tales como hidrogenación asimétrica, Heck carbonilativo y Suzuki asimétrico, esto nos sitúa como uno de los grupos cuyos ligandos poseen uno de los más amplios intervalos de aplicabi-

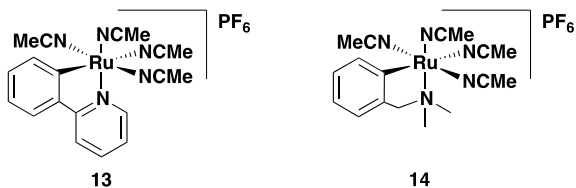
lidad, baja carga catalítica y menores tiempos de reacción lo que es altamente valioso por su potencial aplicación en procesos industriales.

Es relevante mencionar la contribución con otros metales de transición. En 2015, nuestro grupo de investigación, en colaboración con el Dr. Alvarez-Toledano, describió la síntesis de Z-enol-γ-lactonas mediante una reacción de cicloisomerización catalizada por cobre (I) en medio acuoso y microondas (esquema 6), este trabajo fue catalogado como *very important paper* por los editores de la revista lo que llevó al grupo de investigación a ocupar la portada de ese número [28]. Cabe aclarar que las lactonas, lactamas y derivados son compuestos muy importantes para la industria farmacéutica y la química medicinal.



ESQUEMA 6. Síntesis de Z-enol-γ-lactonas mediante una reacción catalizada por cobre (I).

Una de las principales áreas que sigue atrayendo la atención de los investigadores del IQ es el proceso de polimerización, la idea es la posibilidad de controlar el grado de polimerización, así como hacer más suaves y eficientes las condiciones experimentales. Al respecto, el desarrollo y síntesis de nuevos compuestos de coordinación de rutenio (**13**, **14**) [29] ha sido un continuo en la investigación sobre procesos catalíticos en el IQ.



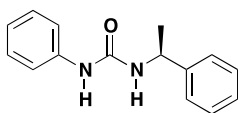
Es posible realizar el proceso de polimerización de acetato de vinilo de manera exitosa, utilizando microondas como fuente de energía, la reacción se lleva a cabo a 70 °C utilizando tetracloruro de carbono como iniciador y agente de transferencia de cadena. En este trabajo se ha evaluado el rol del disolvente y la fuente de calentamiento, encontrando resultados prometedores para este tipo de reacciones.

Habiendo descrito las principales líneas de investigación que se desarrollan en el IQ es necesario pensar en el futuro de la investigación en este campo, como una de las estrategias importantes para seguir explorando líneas de investigación novedosas, que vayan de acuerdo con el desarrollo que la industria y la ciencia demandan; en este sentido uno de los proyectos im-

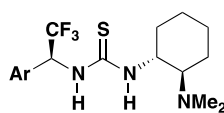
portantes es la incorporación de doctores jóvenes a la planta académica del instituto, que permitirán enriquecer y nutrir la investigación en el área.

En este contexto, uno de los investigadores que se incorporaron recientemente al IQ en el área de catálisis es el Dr. Amézquita-Valencia quien, en 2016, publicó un proceso catalítico *Ligand Free* sin precedentes, utilizando acetato de paladio en presencia de una base para la síntesis de anilinas vía una reacción de transposición de grupo bencilo, este tipo de procesos son muy poco comunes lo que ha valido que este trabajo [30] se haya publicado como *hot paper* en una importante revista del medio. Entre los intereses del Dr. Amézquita se encuentra la catálisis asimétrica mediada por paladio. Finalmente, la Dra. Ana Sofía Varela Gasque, quien se incorporó recientemente a nuestro instituto, realiza investigación enfocada en la activación de CO₂, [31, 32], y los procesos de electrocatálisis por medio de sistemas nanoestructurados [33].

Por último, dentro del IQ, en el Departamento de Química Orgánica también se cultivan otras áreas de la catálisis, como la organocatálisis, este tipo de química no se basa en el uso de metales de transición o ligantes quirales, sino en interacciones que hacen posible un reconocimiento entre moléculas generando un arreglo supramolecular que sirve para dirigir la reactividad en una transformación específica. Al respecto, el principal líder de este tipo de investigación en el IQ es el Dr. Marcos Hernández, cuya línea de investigación se basa en el uso de ureas [34] y tioureas quirales [35] (**15**, **16**) para inducir transformaciones catalíticas sobre sustratos orgánicos. Este tipo de catalizadores actúan formando puentes de hidrógeno, realizando un reconocimiento molecular de estructuras potencialmente aniónicas para facilitar transformaciones quirales y resoluciones cinéticas.



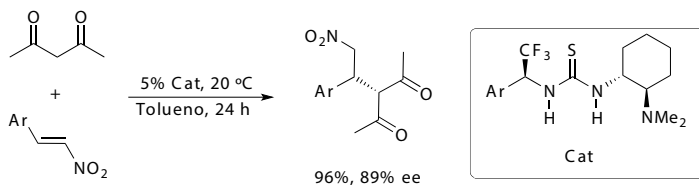
15



16

En general se ha tenido éxito en aplicar este tipo de sistemas a reacciones de adición tipo Michael de la 2,4-pentanediona a β -nitroestireno (esquema 7); la química supramolecular y en particular los procesos catalíticos que comprenden este tipo de principios son un tema de actualidad en cuanto a la catálisis quiral e implica un nicho de oportunidad para hacer investigación básica y aplicada en el área.

En general, se han presentado las principales líneas de investigación que desarrolla el IQ en cuanto a catálisis, cabe aclarar que esta área tiene el más profundo impacto en todas las demás áreas de la química, por ejemplo, en la síntesis de fármacos, síntesis total, síntesis de dispositivos optoelectrónicos,



ESQUEMA 7. Reacción de Michael asimétrica mediante el uso de un derivado quiral de tiourea.

máquinas moleculares, etc. Los métodos que se desarrollan en el IQ alcanzan, en resumen, todas las áreas de la química aplicada.

Conclusiones

El Instituto de Química de la UNAM es una institución con 75 años de renombre y con una sólida tradición de realizar química en nuestro país, este prestigio hace que cuente con los recursos tecnológicos, materiales y humanos para realizar investigación de punta en el área de la catálisis. La institución cuenta con un nutrido grupo de expertos que están encargados en dirigir los esfuerzos individuales y colectivos hacia el desarrollo de metodologías limpias, económicas y adecuadas para el desarrollo de la sociedad y de todos los actores que participan de ella. Por otro lado, el IQ posee los más amplios convenios de colaboración con otras entidades a nivel mundial [15], basta mencionar entre otros, la Universidad de Harvard, el MIT, el CNRS, la Universidad Paul Sabatier (Universidad de Toulouse III) y, por supuesto, ocupa un lugar predominante en colaboraciones con instituciones a nivel nacional, como por ejemplo la Secretaría de Energía, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, la Universidad Autónoma del Estado de México con quien se ha construido el Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, la Universidad Nacional Autónoma del Estado de Morelos, entre otros, por mencionar parte de la inmensa red de colaboración con la que cuenta el IQ para realizar su labor.

Nuestro grupo de investigación, por ejemplo, ha establecido una estrecha relación con investigadores de prestigiosas universidades en Chile y Alemania a través del núcleo milenio, enfocado en impulsar desarrollos catalíticos orientados a resolver procesos industriales en el área de polímeros biodegradables. Actualmente forma parte de un Laboratorio Virtual conformado por diferentes dependencias de la UNAM y dos instituciones francesas, en este laboratorio internacional asociado se desarrolla investigación conjunta para resolver problemas en el área de catálisis enfocando su empleo en el desarrollo de nuevos materiales moleculares con posible aplicación en la ciencia de materiales.

La capacidad del Instituto en cuanto a infraestructura y convenios de colaboración le permiten ser una institución participante en varios programas de posgrado en la universidad, lo que permite que sea participe de la forma-

ción de innumerables recursos humanos en los niveles de licenciatura, maestría, doctorado y un lugar sumamente cotizado para realizar estancias postdoctorales. Todo esto permite afirmar que el IQ de la UNAM debe ser considerado uno de los mejores sitios en México para hacer ciencia y una dependencia que puede brindar lazos de colaboración para una infinidad de proyectos en las más diversas áreas de la ciencia

Referencias

- [1] L. Miramontes, P. Aguinaco, M. A. Romero. (1960). *J. Am. Chem. Soc.*, 82, 6153.
- [2] T. Ríos, F. G. Gómez. (1969). *Tetrahedron Lett.*, 10, 2929.
- [3] A. Rodríguez-Romero, K. G. Ravichandran, M. Soriano-García. (1991). *FEBS Letters*, 291, 307.
- [4] J. Peón. Informe de Actividades, Instituto de Química-UNAM, 2014-2015. <http://www.iquimica.unam.mx/images/documentos/INFORME_2014-2015.pdf>.
- [5] C. Álvarez-Toledano. (2014). Aportes recientes a la historia de la química en México: Departamento de Química Inorgánica, Eds. M. P. Ramos-Lara, F. León-Olivares (eds.). *Ciencia y Tecnología en la Historia de México*. México.
- [6] N. Rosas, J. Gómez-Lara, A. Cabrera, C. Álvarez. (1977). *Revista Latinoamericana de Química*, 8, 121.
- [7] F. Delgado, A. Cabrera, J. Gómez-Lara. (1983). *J. Molecular Catal.*, 22, 83.
- [8] A. Cabrera, J. Gómez-Lara, M. Alcaraz. (1989). *New J. Chem.*, 13, 103.
- [9] A. Cabrera, F. Mathe, Y. Castanet, A. Mortreux, F. Petit. (1991). *J. Mol. Catal.*, 64, L11.
- [10] M. Amezcuita-Valencia, A. Cabrera. (2013). *J. Mol. Catal. A: Chemical*, 366, 17.
- [11] J. L. Arias, P. Sharma, A. Cabrera, F. Beristain, R. Sampere, C. Arizmendi. (2013). *Transition Met. Chem.*, 38, 787.
- [12] H. Arzoumanian, M. Jean, D. Nuel, A. Cabrera, J. L. G. Gutierrez, N. Rosas. (1995). *Organometallics*, 14, 5438.
- [13] L. Rubio-Pérez, F. Pérez-Flores, P. Sharma, L. Velasco, A. Cabrera. (2009). *Org. Lett.*, 11, 265.
- [14] M. A. Pérez, R. Quijada, F. Ortega-Jiménez, C. Álvarez-Toledano. (2005). *J. Mol. Catal. A: Chemical*, 226, 291.
- [15] H. Fernández-Pérez, P. Etayo. A. Panossian, A. Vidal-Ferran. (2011). *Chem. Rev.*, 111, 2119.
- [16] P. Ruiz-Castillo, S. L. Buchwald. (2016). *Chem. Rev.*, 116, 12564.
- [17] <<http://scifinder.cas.org>>.
- [18] D. Morales-Morales. (2007). D. Morales-Morales, C. M. Jensen (EDS.), *The Chemistry of Pincer Compounds*, Elsevier, Amsterdam, ISBN-13: 978-0-444-53138-4.
- [19] M. Asay, D. Morales-Morales. (2015). *Dalton Trans.*, 44, 17432.
- [20] M. Basauri-Molina, S. Hernández-Ortega, D. Morales-Morales. (2014). *Eur. J. Inorg. Chem.*, 4619.
- [21] D. F. Brayton, P. R. Beaumont, E. Y. Fukushima, H. T. Sartain, D. Morales-Morales, C. M. Jensen. (2014). *Organometallics*, 33, 5198.

- [22] J. V. Suárez-Meneses, E. Bonilla-Reyes, E. A. Blé-González, M. C. Ortega-Alfaro, R. A. Toscano, A. Cordero-Vargas, J. G. López-Cortés. (2014). *Tetrahedron*, 70, 1422.
- [23] J. V. Suárez-Meneses, A. Oukhrib, M. Gouygou, M. Urrutigoity, J.-C. Daran, A. Cordero-Vargas, M. C. Ortega-Alfaro, J. G. López-Cortés. (2016). *Dalton Trans.*, 45, 9621.
- [24] F. Ortega-Jiménez, J. G. Penieres-Carrillo, S. Lagunas-Rivera, J. G. López-Cortés, C. Álvarez-Toledano, M. C. Ortega-Alfaro. (2015). *RSC Adv.*, 5, 80911.
- [25] J. G. López-Cortés, L. F. Contreras de la Cruz, M. C. Ortega-Alfaro, R. A. Toscano, C. Álvarez-Toledano, H. Rudler. (2005). *J. Organomet. Chem.*, 690, 2229.
- [26 a] E. P. Sanchez-Rodríguez, F. Hochberger-Roa, R. Corona-Sánchez, J. E. Barquera-Lozada, R. A. Toscano, M. Urrutigoity, M. Gouygou, M. C. Ortega-Alfaro, J. G. López-Cortés. (2017). *Dalton Trans.*, 46, 1510; [26 b] R. Corona-Sánchez, R. A. Toscano, M. C. Ortega-Alfaro, C. Sandoval-Sánchez, J. G. López-Cortés. (2013). *Dalton Trans.*, 42, 11992.
- [27] F. F. K. Hochberger-Roa, J. G. López-Cortés. (2016). Expediente de Patente: MX/a/2015/016922, México.
- [28] M. E. López-Reyes, R. A. Toscano, J. G. López-Cortés, C. Álvarez-Toledano. (2015). *Asian J. Org. Chem.*, 4, 545.
- [29] J. Olvera-Mancilla, S. López-Morales, J. Palacios-Alquisira, D. Morales-Morales, R. Le Lagadec, L. Alexandrova. (2014). *Polymer*, 55, 1656.
- [30] M. Amézquita-Valencia, H. Alper. (2016). *Chem. Eur. J.*, 22, 16774.
- [31] H. Mistry, A. S. Varela, C. S. Bonifacio, I. Zegkinoglou, I. Sinev, Y.-W. Choi, K. Kisslinger, E. A. Stach, J. Yang, P. Strasser. (2016). *Nature Commun.*, 7, 12123.
- [32] A. S. Varela, W. Ju, T. Reier, P. Strasser. (2016). *ACS Catal.*, 6, 2136.
- [33] H. Mistry, A. S. Varela, S. Köhl, P. Strasser, B. Roldan-Cuenya. (2016). *Nature Rev. Mater.*, 1, 16009.
- [34] M. Cortés-Hernández, S. Rojas-Lima, M. Hernández-Rodríguez, J. Cruz-Borbo-lla, H. López-Ruiz. (2016). *Helv. Chim. Acta*, 99, 416.
- [35] E. I. Jiménez, W. E. Vallejo-Narváez, C. A. Román-Chavarría, J. Vázquez-Chávez, T. Rocha-Rinza, M. Hernández-Rodríguez. (2016). *J. Org. Chem.*, 81, 7419.

Instituto de Física-UNAM*

Gabriela Díaz Guerrero**

RESUMEN: En esta contribución se describen las actividades de investigación en catálisis heterogénea que se realizan en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IFUNAM). Se presenta una breve reseña histórica de su desarrollo en el Instituto. Asimismo, se da a conocer la línea de investigación general y los intereses científicos asociados; las metodologías de síntesis que se utilizan; la infraestructura para la caracterización fisicoquímica de los catalizadores; los campos de aplicación en los que se trabaja y las colaboraciones que se mantienen con otras dependencias de la UNAM y con universidades y centros de investigación en México y en el extranjero. Se mencionan también los instrumentos de protección solicitados. Se reporta acerca de las actividades de docencia y formación de recursos humanos a nivel licenciatura y posgrado en el marco de posgrados PNPC-CONACYT. Finalmente, se exponen los logros recientes en el área y las perspectivas.

PALABRAS CLAVE: IFUNAM, nanocatálisis, nanomateriales.

ABSTRACT: In this contribution the research activities in heterogeneous catalysis performed at the Institute of Physics (IF) of the National Autonomous University of Mexico (UNAM) are described. A brief description of IFUNAM and the historical review of development at catalysis activities at the institute is presented. The general research line in heterogeneous catalysis, the scientific interests and fields of application, the methodologies for synthesis and infrastructure for physicochemical characterization are presented. Collaboration with other groups at UNAM, universities and research centers in Mexico and abroad are mentioned. Teaching and human resources formation activities are reported. Finally, the main recent achievements in catalysis and areas of opportunity are presented.

KEYWORDS: IFUNAM, nanocatalysis, nanomaterials.

El Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IFUNAM) tiene como misión realizar investigación en física y áreas afines, formar recursos humanos a través de la docencia y la preparación de investigadores y especialistas de alto nivel, difundir nacional e internacionalmente los conocimientos que genera e impulsar la vinculación de la ciencia con otras actividades culturales, intelectuales y productivas del país. Su participación en diversos proyectos nacionales e internacionales indica la calidad y el compromiso con la investigación, la docencia, la formación de recursos humanos, la creación de infraestructura y la generación de nuevas entidades de investigación.

Recibido: 23 de enero de 2017. Aceptado: 15 de marzo de 2017.

* Se agradece al L. Comunicación Gráfica, José Luis Novoa Sandoval, del Área de Diseño y Fotografía del IFUNAM por su apoyo en el registro fotográfico para la elaboración de este documento.

** Responsable del Grupo Reactividad Catalítica de Nanomateriales, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Cd. Mx., México. Correspondencia: (diaz@fisica.unam.mx). Tel. +52 (55) 5622-5097.

La labor académica del IFUNAM se desarrolla en seis departamentos: Estado Sólido, Física Experimental, Física Química, Física Teórica, Materia Condensada y Sistemas Complejos, donde se agrupan los investigadores y la mayoría de los técnicos académicos de una planta académica constituida por 127 investigadores y 52 técnicos académicos. Una fracción importante de los académicos del Instituto (25%) realiza investigación básica y aplicada en nanociencias y nanotecnología (NyN). Una descripción detallada de las líneas de investigación, infraestructura y otras actividades que se realizan en NyN en el IFUNAM, se puede consultar en el *Catálogo nacional de instituciones de investigación con actividades en nanociencias y nanotecnología*, parte 1, publicado por *Mundo Nano Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, en 2016.

Las propiedades de sistemas a la escala nanométrica dan lugar a una gran variedad de aplicaciones de gran impacto, entre las que se encuentra la catálisis heterogénea. La catálisis en el IFUNAM empezó a cultivarse en 1974 con un enfoque teórico; la elucidación de mecanismos de reacción en colaboración con investigadores de otras instituciones, fueron el objetivo en esos trabajos. Por su parte, la catálisis heterogénea experimental inicia en 1984 cuando se integra formalmente el grupo de investigación en sulfuros y pequeñas partículas metálicas. La correlación entre la actividad y la estructura de las “pequeñas partículas”, esta última determinada aprovechando la infraestructura física con que contaba el IFUNAM, se constituyó en la fuerza impulsora para el desarrollo de los proyectos de investigación del grupo. Las “pequeñas partículas” de ese entonces son las nanopartículas (NP) en el lenguaje de la nanociencia y la nanotecnología. Hacia 1990 parte del grupo de catálisis emigra al entonces Laboratorio de Ensenada del IFUNAM, hoy Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM. Otras actividades desarrolladas en esos años se relacionan con la Academia de Catálisis A.C., organización que agrupa a investigadores y estudiantes de instituciones de educación superior y centros de investigación de nuestro país que trabajan en catálisis. El grupo de catálisis del IFUNAM tuvo una participación esencial para su integración en el año 1988 y su promoción a nivel nacional e internacional a través de la organización de eventos académicos.



FIGURA 1. Instituto de Física de la UNAM.

Si bien los sistemas catalíticos emplean desde tiempo atrás fases activas basadas en NP de metales, óxidos o sulfuros, los avances de las últimas décadas tanto en métodos de preparación como técnicas de caracterización, han permitido un mejor control del tamaño y la forma, así como un conocimiento más profundo de los principios básicos que dominan este campo. Esta capacidad creciente de diseño lleva al desarrollo de sistemas catalíticos más activos, selectivos y estables para muchas aplicaciones y es el ámbito en el que se mueve lo que hoy se denomina nanocatálisis.

Línea de investigación en nanocatálisis

La investigación experimental en este campo la lleva a cabo el Grupo de Reactividad Catalítica de Nanomateriales, del Departamento de Física Química. Los trabajos de investigación se realizan en el marco de la línea de investigación general:

Estructura y propiedades catalíticas de nanopartículas con aplicación en medio ambiente, energía y química fina. Donde, con un enfoque básico, se abordan aspectos relacionados con la cinética, la selectividad y la estabilidad de los sistemas catalíticos.

En el marco general de esta línea de investigación, se estudian NPs de metales a base de uno o dos componentes (mono y bimetálicas) de un metal del grupo del platino, combinaciones entre ellos o con metales de acuñación, el cobre, la plata y el oro, y de óxidos a base de cobre o níquel soportados en matrices nanoestructuradas. Los problemas que se estudian son la influencia que tienen en la estructura y propiedades de la fase activa (actividad, selectividad y estabilidad), el soporte, el tamaño y la composición de la partícula metálica.

A continuación, se desglosan las metodologías utilizadas para la síntesis, caracterización y los campos de aplicación en los que se trabaja.

Síntesis:

- de óxidos de metales de transición nanoestructurados, puros, dopados y mixtos utilizando técnicas hidro y solvotermales, sol-gel y precipitación.
- de nanopartículas metálicas de uno o dos componentes y su depósito en la superficie de óxidos reducibles y no reducibles, utilizando métodos en fase líquida como impregnación, adsorción electrostática fuerte y depósito-precipitación.
- de nanopartículas de metales del grupo de acuñación, utilizando métodos coloidales.

Caracterización fisicoquímica:

- Técnicas de microscopía electrónica: barrido, transmisión, alta resolución, contraste Z, STEM-EDS, EELS, micro-difracción.

- Difracción de rayos-X y métodos de refinación de la estructura cristalina.
- Adsorción física de nitrógeno; área específica, distribución y tamaño medio de poro.
- Técnicas termo-programadas; TPR, TPO, TPD acopladas a detectores de conductividad térmica (TCD) o a espectrometría de masas (MS).
- Adsorción química de moléculas (H_2 , CO, N_2O) para estimación de la dispersión metálica utilizando la técnica de pulsos.
- Caracterización espectroscópica por FTIR, Raman y UV-vis.
- Seguimiento por DRIFTS de moléculas sonda adsorbidas y reacciones catalíticas *in-situ* y *operando*. Se realizan para caracterizar la superficie reactiva y seguir la evolución de las especies adsorbidas en condiciones de reacción.

Aplicaciones

Medio ambiente:

Se estudian reacciones para el abatimiento de contaminantes atmosféricos gaseosos, tales como, CO, NO, CO_2 , CH_4 y compuestos orgánicos volátiles. Para ello se utilizan reacciones catalíticas de oxidación o reducción. Se tiene particular interés en la transformación de gases con fuerte efecto invernadero como el CO_2 y el CH_4 usando la reacción de reformado seco para producir gas de síntesis. Asimismo, se estudian catalizadores nanoestructurados para eliminación de óxidos de nitrógeno.

Energía:

En este campo de aplicación nos concentramos en la producción y purificación de hidrógeno. Se trabaja con reacciones de reformación húmeda y autotérmica de alcoholes como metanol y etanol. También la reacción de oxidación parcial en condiciones subestequiométricas. Para la purificación de hidrógeno se estudian las reacciones de desplazamiento de gas de agua (WGS) y la oxidación preferencial de CO (PROX).

Química fina:

En este campo se trabaja principalmente con reacciones de hidrogenación de aldehídos y cetonas alfa, beta insaturadas en fase líquida, para la obtención de alcoholes insaturados.

Otros grupos sintetizan nanomateriales con potenciales aplicaciones catalíticas y fotocatalíticas. Desde un punto de vista teórico, se estudian aspectos ligados a la actividad catalítica de cúmulos metálicos y bimetálicos, tanto en fase gas como soportados en óxidos para reacciones químicas sencillas, como la oxidación de CO. Para ello se usa la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT), implementada en códigos computacionales como SIESTA,

ADF y Quantum Espresso (instalados en la supercomputadora Miztli de la UNAM). También métodos como el *Nudged Elastic Band* (NEB) que permite la estimación de las barreras de energía involucradas en reacciones catalíticas. Con estas herramientas es posible investigar los efectos del tamaño y la composición de los cúmulos, de su estado de carga, así como del tipo de soporte, en las energías de adsorción de los reactivos (o productos) así como en las energías de activación asociadas.

Colaboraciones

Las colaboraciones establecidas tienen lugar con investigadores del IFUNAM tanto experimentales como teóricos de los departamentos de Física Química, Estado Sólido, Materia Condensada, Sistemas Complejos y Física Teórica; con investigadores de otras dependencias de la UNAM y de universidades y centros de investigación en el país y en el extranjero. De la UNAM, con el Centro de Nanociencias y Nanotecnología en Ensenada; el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico; y la Facultad de Química, Depto. de Ingeniería Química. Instituciones nacionales, la Universidad Autónoma Metropolitana, Campus Iztapalapa y Azcapotzalco; el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Departamento de Tecnología de Materiales; la Universidad de Sonora, Departamento de Polímeros y Nanopartículas Metálicas; la Universidad del Papaloapan, Campus Tuxtepec; la Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Ciénega. En el extranjero: la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; en Argentina, la Planta Piloto de Ingeniería Química, PLAPIQUI; el Instituto de Investigaciones Fisicoquímicas, Teóricas, Aplicadas, INIFTA; la Universidad Nacional de Córdoba; en Estados Unidos con la Universidad de Texas en San Antonio; y, en Francia, con el Laboratoire de Catalyse et Spectrochimie, ENSICAEN. Se forma parte de la Red de Nanociencias y Nanotecnología del CONACyT.

Infraestructura

La infraestructura dedicada a la síntesis y estudio de propiedades catalíticas se detalla a continuación.

- Autosorb 1-MP, Quantachrome Instruments. Equipo de adsorción de gases (modelo BET) para el estudio de propiedades texturales de sólidos meso y micro porosos.
- RIG-100 In-Situ Research Instruments. Equipado con cuatro controladores de flujo másico, saturador para líquidos, reactor de cuarzo, horno y controlador de temperatura de ambiente a 1000 °C y detector de conductividad térmica (TCD). Permite determinar área BET (un solo punto), experimentos TPR, TPO, TPD y reacciones catalíticas en flujo y a presión atmosférica. Software RIG-100 Upgrade

2006. Se utiliza de manera independiente o acoplado a cromatógrafos de gases, dependiendo del estudio a realizar.
- Cromatógrafos de gases. Se utilizan acoplados a los sistemas de reacción para analizar la composición de los gases de entrada y salida del reactor. a) Marca Agilent; modelo 6850 para columnas empacadas con detector TCD y modelo 7890B para columnas capilares y empacadas con detectores TCD y FID. Éste cuenta con un sistema para muestreo automático de líquidos. Ambos trabajan con Software Open Lab V. A.04.05. b) Cromatógrafo de gases Gow-Mac Serie 580 equipado con columnas empacadas y detector TCD. Utiliza software Clarity V. 4.0.0.681.
 - Sistemas de evaluación de actividad catalítica. Constan de un reactor tubular de cuarzo, horno con controlador de temperatura en el intervalo ambiente-1000 °C, válvulas para alimentar los gases de reacción y bomba HPLC Jasco PU-2080 para alimentar reactivos líquidos. Los sistemas de reacción se encuentran acoplados a cromatógrafos de gases (Agilent o Gow-Mac). Se utilizan para estudiar reacciones en fase gas, tales, como reformación de alcoholes, reformado seco de metano, oxidación de CO y VOCs, reducción de óxidos de nitrógeno (NO y N₂O) y otras reacciones de transformación de hidrocarburos (hidrogenación e hidrogenólisis).
 - Espectrómetro de masas HPR-20, Hiden Analytical. Este equipo es un sistema de análisis de gases en tiempo real; cuenta con un detector tipo cuadruplo y detecta masas de 1-200 unidades de masa atómica.

FIGURA 2. Unidad multitareas para caracterización integral de catalizadores y equipo para determinación de propiedades texturales.





FIGURA 3. Espectrofotómetro con celda DRIFT acoplada; reactor de alta presión para estudio de reacciones en fase líquida; autoclaves para síntesis hidrotermal.

mica. El equipo está acoplado a un sistema de reacción con reactor tubular de cuarzo de lecho fijo, sistema de alimentación de gases y una válvula de inyección de pulsos. Cuenta con un Software Hiden MASoft V. 4.0.

- Espectrofotómetros FTIR. Thermo Nicolet iS50 FTIR. Este espectrómetro opera en el intervalo del infrarrojo medio; cuenta con 2 detectores, uno estándar DTGS-KBr y otro MCT/A. El intervalo espectral del primero es de 400 a 4000 cm^{-1} y el del segundo es de 600 a 4000 cm^{-1} . El espectrómetro utiliza el software OMNI 9.2.98 de Thermo Scientific. Nicolet Nexus 640 FTIR opera en el intervalo del infrarrojo medio, cuenta con un detector estándar DTGS-KBr.
- Celdas DRIFT para trabajar en atmósfera y temperatura controlada (hasta 500 °C). Marca Pike Technologies y Harrick. En este accesorio acoplado a los espectrofotómetros iS50 y Nexus, se realizan estudios de moléculas adsorbidas y seguimiento de reacciones en la superficie de catalizadores, tanto en función de la temperatura como del tiempo.
- Reactor de alta presión Parr modelo 4566. El reactor de acero inoxidable tiene un volumen de 300 ml y cuenta con agitación. Presión y temperatura máxima de 3000 PSI y 350 °C. Este equipo se utiliza para estudiar reacciones en fase líquida a alta presión.
- Horno Binder y Autoclaves Parr. Se utilizan para la síntesis hidrotermal de materiales. El horno opera de temperatura ambiente a 200 °C y cuenta con programación de rampas de calentamiento. Autoclaves Parr en acero inoxidable con un volumen de 80 a 200 ml.
- Equipo para tratamientos térmicos. Trabajan de temperatura ambiente a 1000 °C con posibilidad de establecer rampas de calentamiento y enfriamiento. Muflas Carboline CSF 1200 y Thermolyne 4800. Hornos de tubo Lindberg SB y MTI OTF-1200X con sistema de válvulas de aguja para alimentar gases.

Como parte de la infraestructura del IFUNAM que se encuentra ubicada en unidades de servicio o en otros grupos de investigación:

- Microscopio electrónico de transmisión JEOL JEM-2010FEG con una resolución de 0.19 nm. Cuenta con unidad STEM y posibilidad de análisis por contraste Z (HAADF), análisis por EELS y microsonda EDS.
- Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-7800F con una resolución de 0.7 nm, equipado con detectores de electrones secundarios y retrodispersados, y de una microsonda para realizar análisis por EDS.
- Microscopio de fuerza atómica JEOL JSPM-4210 con una resolución vertical 0.001 nm y de 0.01 nm horizontal. Las muestras se pueden trabajar a presión atmosférica y hasta una presión de 10^{-6} torr.
- Difractómetros de rayos X Brucker Advanced D8 y D-8 Discover. Ánodos de Cu o Mo y detector Lynxeye. Se cuenta con los códigos para realizar refinamiento de estructura cristalina por el método Rietveld, TOPAS y código libre.
- Espectrómetro Raman Thermo Scientific DRX Raman Microscope multilongitud de onda y espectrofotómetro UV-vis Ocean Optics USB2000.

Instrumentos de protección intelectual

Se tiene solicitada la patente “Proceso para la preparación de catalizadores de paladio y platino soportados en óxidos nanoestructurados para convertidores catalíticos”, con identificador MX/a/2010/012921, la cual se elaboró en colaboración con el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM. Se ha dado respuesta al primer requerimiento.

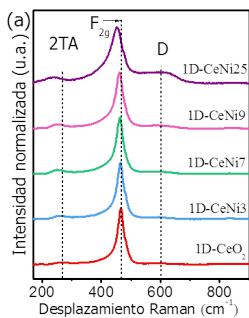
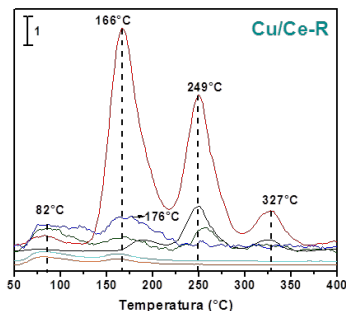
Docencia y formación de recursos humanos

Se forma parte del padrón de tutores en los Posgrados de Ciencia e Ingeniería de Materiales (PCEIM) y de Ciencias Físicas de la UNAM. A nivel licenciatura se participa en actividades como Estancias Académicas de alumnos de la Facultad de Química de la UNAM. Las actividades docentes y de formación de recursos humanos involucran clases frente a grupo, la supervisión de servicios sociales, la dirección de tesis de posgrado y de licenciatura (de la UNAM y de universidades estatales) e investigadores posdoctorales. Estudiantes de las áreas de química e ingeniería química, principalmente, aunque también físicos, realizan tesis en nuestro grupo. Adicionalmente, se participa como tutor en estancias cortas de estudiantes de los programas, Jóvenes hacia la Investigación de la Dirección General de Divulgación de la Ciencia-UNAM y del Verano de la Investigación Científica de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC).

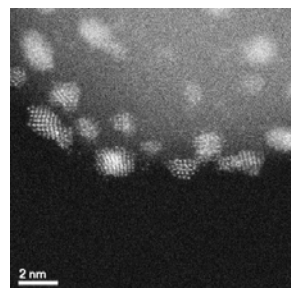
Principales logros y perspectivas

Algunos de los principales logros en los últimos cinco años son los siguientes:

- Producción y purificación de hidrógeno. Con la necesidad de combustibles limpios en un marco de desarrollo sustentable, se investigan óxidos reducibles, en particular el efecto de la morfología (1D, poliedros y cubos) donde la exposición de planos específicos y su interacción con NPs de metales u óxidos dan lugar a sitios interfaciales partícula-soporte que derivan en efectos sinérgicos de la actividad o en la estabilización de la fase activa en el catalizador. Se han estudiado catalizadores Cu/CeO₂ en la reacción de oxidación parcial de metanol evidenciando el efecto de los planos expuestos del soporte en la actividad y selectividad del catalizador.
- En el reformado de etanol usando NP de Ni soportadas en Al₂O₃-La₂O₃ preparadas por sol-gel, se mostró el efecto de la adición de lantana en la selectividad y estabilidad del catalizador y cómo este aditivo modula la acidez superficial de la alúmina disminuyendo así las reacciones secundarias que llevan al depósito de carbón y que son causa de desactivación del catalizador.



- La síntesis de nanobarras de ceria dopada con níquel, por el método hidrotermal, no reportada a la fecha. El efecto del incremento de la concentración del dopante en la morfología (modificación de la relación de aspecto de la nanobarra) y en la capacidad de almacenamiento de oxígeno. El estudio de sus propiedades como catalizador o soporte de cobre en reacciones WGS y de oxidación de CO.
- El efecto de la temperatura de reducción a alta temperatura en la estructura y propiedades catalíticas (actividad y selectividad) de NPs de iridio soportadas en óxido de titanio fue estudiado en la reacción modelo de apertura del ciclo del metilciclopentano. Se analizó el catalizador por microscopía electrónica proponiendo una metodología para el estudio de la composición de columnas atómicas.
- Efecto del plasmón de superficie en NPs metálicas como coadyuvante en reacciones catalíticas heterogéneas. Las NPs presentan diferentes plasmones en función del tamaño, la forma o el ambiente en el que se encuentren. Estudiamos NPs de plata soportadas para la reacción PROX estudiando el efecto del plasmón de superficie en las propiedades del catalizador. En el estu-



dio de NPs bimetálicas Au-Ir soportadas en titanía para la hidrogenación selectiva del citral se evidenciaron efectos de transferencia de carga entre los metales, que explican la actividad y selectividad observadas en función de la composición de las partículas.

- En el reformado seco de metano, analizamos el efecto de la composición en catalizadores bimetálicos a base de un metal noble y níquel o cobre, soportados en ceria, analizamos el efecto de la composición en catalizadores bimetálicos a base de un metal noble y níquel o cobre, soportados en ceria.

En las perspectivas de desarrollo a corto plazo de nuevos temas y/o ampliación de los actuales podemos citar:

- Estudios con metodología *in situ/operando* para la caracterización de la dinámica de los procesos catalíticos que abordamos.
- Fotocatálisis para obtención de hidrógeno a partir de agua y por reformación de fuentes renovables, asimismo, para eliminación de compuestos orgánicos en el marco del estudio del plasmón de superficie en nanopartículas metálicas.
- Procesos de transformación catalítica del CO₂.

Sitios de interés relacionados con el IFUNAM

- Página institucional:
<www.fisica.unam.mx>
- Página del Grupo Reactividad Catalítica de Nanomateriales:
<<http://www.fisica.unam.mx/grupos/catalisis/>>
- Laboratorio Central de Microscopía:
<<http://www.fisica.unam.mx/laboratorios/lcm/>>

La catálisis en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico*

Rodolfo Zanella**

RESUMEN: En este trabajo se describe el origen de los estudios sobre catálisis en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la Universidad Nacional Autónoma de México, la evolución de los mismos y las líneas de investigación y desarrollo que se cultivan actualmente en dicha área; asimismo, se describen los proyectos que se desarrollan hoy en día y los concluidos en los pasados diez años. Se hace un recuento de las colaboraciones establecidas, de la infraestructura disponible para realizar investigación en el área de catálisis y de los principales logros obtenidos en los últimos años. Al final del trabajo se presentan las perspectivas que, desde el punto de vista de los académicos del Centro que trabajan en catálisis, tiene esta área para el futuro.

PALABRAS CLAVE: CCADET, catálisis heterogénea, fotocatalisis, nanocatálisis, oro, platino.

ABSTRACT: This work describes the origin of the studies on catalysis at the Center for Applied Sciences and Technological Development (Spanish acronym: CCADET) of the National Autonomous University of Mexico, their evolution, and the lines of research and development that are currently being pursued in this field. The projects that are being developed and those that were concluded in the last ten years are also described. An account of the collaborations that have been established, the infrastructure available to carry out research in the area and the main achievements in the field of catalysis in recent years is given. At the end of the paper, the future perspectives for this area, from the point of view of the members of the academic community of the Center working in catalysis, are presented.

KEYWORDS: CCADET, heterogeneous catalysis, photocatalysis, nanocatalysis, gold, platinum.

Introducción

El Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) forma parte del Subsistema de la Investigación Científica de la UNAM, integrado por más de 30 institutos y centros de investigación. El CCADET se encuentra ubicado en el Circuito Exterior de Ciudad Universitaria en la Ciudad de México, rodeado por la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel (figura 1). El trabajo académico del CCADET conjunta la docencia, la investigación y la difu-

Recibido: 20 de enero de 2017. Aceptado: 2 de marzo de 2017.

* Se agradece la información proporcionada por el Dr. José M. Saniger Blesa, la cual fue muy valiosa para describir los orígenes y los antecedentes de los estudios sobre catálisis en el CCADET; asimismo, la de los doctores Juan Carlos Durán y Ma. Del Rocío Redón, sobre su trabajo en catálisis; al Sr. Francisco Cabiedes Contreras por la toma de las imágenes con las que fue ilustrado este trabajo, y a la Lic. Nora Reyes Rocafuerte.

** Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico-UNAM. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, A.P. 70-186, C.P. 04510, Delegación Coyoacán, Cd. Mx., México.
Correspondencia: (rodolfo.zanella@ccadet.unam.mx), tel. +52 (55) 56228601.



Figura 1. Instalaciones del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico en Ciudad Universitaria.

sión de la cultura, es una entidad multi e interdisciplinaria especializada en instrumentación científica e industrial, micro y nanotecnologías, tecnologías de la información, y enseñanza de las ciencias; conjunta su especialización en los campos arriba mencionados y dirige su experiencia a las áreas de salud, medio ambiente, energía, y educación. En el campo de conocimiento de las micro y nanotecnologías (*Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, vol.9, núm.16) se estudia principalmente el desarrollo de nanomateriales y microdispositivos con aplicaciones en salud, medio ambiente y energía; películas delgadas; desarrollo de plataformas espectroscópicas para el estudio de interacciones moleculares; nanocatálisis y fotocatalisis; materiales nanoestructurados de carbono y materiales magnéticos suaves y nanoestructurados.

Los estudios de catálisis en el CCADET se originan en proyectos relacionados con el manejo del hexafluoruro de uranio (UF_6) y con el estudio de la corrosión por UF_6 de la aleación Al-7075, los cuales establecieron, a su vez, las raíces para la formación del Grupo de Química de Materiales del entonces Centro de Instrumentos. Estos proyectos alentaron, a finales de los años ochenta del siglo XX, a la tesis doctoral del Dr. José M. Saniger Blesa (actualmente investigador titular C y exdirector del CCADET) y a las tesis de tres es-

tudiantes de licenciatura. La corrosión ocurría por la reacción del vapor de UF_6 sobre la superficie del Al-7075, se trataba del estudio de una reacción sólido-gas y de los productos de reacción que se originaban en la superficie del sólido. Concluido este proyecto, y aprovechando la experiencia acumulada sobre la fluoración directa de materiales con flúor gaseoso, se vio como un nicho de oportunidad el estudio de la modificación de las propiedades de algunos materiales, especialmente óxidos, al promover una sustitución parcial de oxígeno por flúor en su estructura, a través de un proceso de fluoración directa. Los materiales seleccionados para este fin fueron las zeolitas y las alúminas de transición, ambos ampliamente utilizados como materiales catalíticos, ya sea como catalizadores intrínsecos o como soportes para el depósito de nanopartículas con actividad catalítica. Como es bien sabido, la fluoración de zeolitas y alúminas de transición modifica fuertemente su acidez superficial, por lo que se propuso que una fluoración controlada de estos materiales permitiría modular su acidez y en consecuencia mejorar su actividad y/o selectividad hacia reacciones específicas.

Los primeros estudios de sustitución O/F se llevaron a cabo sobre la zeolita 4A, con la idea de probarla como un agente fluorante suave. Los resultados obtenidos no fueron los esperados y los estudios se detuvieron por algún tiempo, renovándose a finales de los años noventa con la intención de conocer detalladamente los procesos de fluoración de estos materiales y trabajando en esta ocasión con dos tipos de zeolitas, la HY y la ZSM5, ampliamente utilizadas como catalizadores en la industria petrolera. La realización de estos trabajos formó parte de la tesis doctoral de la Dra. Norma A. Sánchez Flores (actualmente técnico académico titular C en el CCADET); a partir de estos trabajos se establecieron colaboraciones con grupos catalíticos del país (en especial con el IMP y el IFUNAM) y del exterior (Francia), interesados en el estudio y caracterización de zeolitas fluoradas, principalmente con el Dr. José J. Fripiat, quien durante varios años fue profesor invitado del Grupo de Materiales y Sensores, que más tarde se convirtió en el Grupo de Materiales y Nanotecnología.

En la primera década de este siglo, se comenzó a trabajar en la síntesis de otros materiales de interés catalítico y fotocatalítico, preferencialmente SiO_2 y TiO_2 . Para ello se planteó un método novedoso de síntesis de óxidos a través de la sonólisis de una mezcla de alcóxidos y H_2O en ausencia de catalizador, lo cual permitió obtener óxidos de titanio o de silicio de alta pureza, con un área específica muy alta (de hasta $700 \text{ m}^2/\text{g}$) y con propiedades texturales que pudieron modularse según la atmósfera en la que se llevó a cabo la reacción de sonólisis. Este trabajo fue la tesis doctoral del Dr. José Ocotlán Flores Flores (actualmente técnico académico titular B en el CCADET).

Con estos antecedentes, el inicio de los trabajos sistemáticos sobre catálisis en el entonces laboratorio de materiales y sensores se sitúa hacia los años 2004-2005, cuando concurren dos circunstancias favorables: la incorporación al grupo como becarios posdoctorales de los doctores María del Rocío

Redón y Rodolfo Zanella y la participación del CCADET en el Proyecto Universitario de Nanotecnología Ambiental (PUNTA), en el que fungieron el Dr. José M. Saniger Blesa, como coordinador de dicho proyecto, y el Dr. Rodolfo Zanella Specia, como responsable del proyecto de desarrollo de nanocatalizadores de Au depositados en soportes reducibles, para su uso en reacciones de abatimiento de la contaminación atmosférica. Es así como se inicia el desarrollo sistemático y sostenido de una nueva línea de investigación en el CCADET en torno al estudio de materiales catalíticos y fotocatalíticos, para el abatimiento de la contaminación del aire, procesos fotocatalíticos para la degradación y mineralización de contaminantes orgánicos en agua y reacciones tanto catalíticas como fotocatalíticas para la producción y purificación de hidrógeno. Estos estudios los realiza el actual Grupo de Materiales y Nanotecnología, integrado por 8 investigadores y 6 técnicos académicos, de los cuales 3 investigadores y un técnico académico tienen como área de investigación principal los procesos catalíticos, sin embargo, hay otros investigadores y técnicos académicos que inciden de manera directa o indirecta en estudios de catálisis, aunque ésta no sea su línea de investigación o de desarrollo principal. Adicionalmente, hay dos becarios posdoctorales y más de una docena de estudiantes realizando sus tesis de licenciatura, maestría y doctorado en temas relacionados con catálisis homogénea, heterogénea y fotocatalisis.

Asimismo, entre los años 2012 y 2013 se crearon en el CCADET, con el aval de la Coordinación de la Investigación Científica de la UNAM, dos Laboratorios Universitarios, el de Nanotecnología Ambiental (LUNA) y el de Caracterización Espectroscópica (LUCE). En la figura 2 se muestran algunas imágenes del edificio y algunos de los equipos de dichos laboratorios. El LUNA tiene como objetivo apoyar el desarrollo científico y tecnológico, la docencia, la formación de recursos humanos de alta calidad así como a la industria nacional mediante la prestación de servicios altamente especializados en las áreas de materiales nanoestructurados, catálisis, fotocatalisis, medio ambiente y energía. Cuenta con varios equipos de evaluación catalítica en fase gas acoplados a cromatógrafos de gases con detectores de masas, un cromatógrafo de líquidos acoplado a un espectrómetro de masas de triple cuadrupolo y equipos para medir carbono orgánico e inorgánico y nitrógeno total en muestras, además de equipos para estudiar reacciones fotocatalíticas para resolver problemas de contaminación, así como equipos para estudiar la generación fotocatalítica de hidrógeno a partir del agua. Por otra parte, el propósito del LUCE es apoyar los proyectos de investigación y desarrollo tecnológico relacionados con el estudio espectroscópico de materiales, así como contribuir a la formación de recursos humanos en este campo a nivel de licenciatura y posgrado, y apoyar al sector público e industrial del país a través de proyectos de desarrollo conjuntos o prestación de servicios altamente especializados. Cuenta con equipos avanzados de espectroscopía Raman, infrarroja, UV-VIS-NIR y de fotoluminiscencia, además de microscopios de fuerza atómica y óptica. Estos dos laboratorios junto con los académicos



FIGURA 2. Los laboratorios universitarios en el CCADET y algunos de sus equipamientos.

micos que lo integran apoyan fuertemente la investigación que se realiza en catálisis heterogénea y fotocatalisis en el CCADET.

Líneas de investigación y desarrollo y proyectos patrocinados en el área de catálisis

Las líneas de investigación que se cultivan en el Grupo de Materiales y Nanotecnología y en los laboratorios LUNA y LUCE del CCADET relacionadas con catálisis son: reacciones de abatimiento de la contaminación atmosférica (oxidación de CO, reducción de NO, oxidación total de hidrocarburos); reacciones enfocadas a la producción y purificación de hidrógeno (reacción de desplazamiento del gas de agua o *water gas shift*), reacción de ruptura de la molécula de agua (*water splitting*) y oxidación preferencial de CO (PROX); degradación y mineralización fotocatalítica de compuestos orgánicos (contaminantes emergentes y convencionales) en aguas empleando luz UV y luz solar simulada; fotosíntesis artificial; depósito de nanopartículas metálicas y bimetalicas (Au, Ag, Cu, Ni, Ru, Co, Ir y Fe) sobre óxidos reducibles y no reducibles (ej. TiO_2 , CeO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , MgO , ZnO , CuO , Bi_2O_3) por métodos en fase líquida (depósito-precipitación, adsorción de iones, rutas coloidales); síntesis de óxidos metálicos nanométricos puros, dopados y mixtos, así como la



FIGURA 3. Los 2 equipos de evaluación catalítica en fase gas con que cuenta el Laboratorio Universitario de Nanotecnología Ambiental.

síntesis y evaluación catalítica de nanopartículas metálicas del grupo del platino y su comparación con compuestos organometálicos discretos y con compuestos dendriméricos organometálicos.

Los proyectos financiados que actualmente se desarrollan en torno a la catálisis en el CCADET son los siguientes:

- a) Financiados por CONACYT en alguna de sus diferentes convocatorias: i) Nanocatalizadores para el control de la contaminación en ambientes cerrados; ii) Síntesis y caracterización de materiales a base de nanopartículas de Au soportadas en TiO_2 puro y modificado para la producción fotocatalítica de H_2 ; iii) Degradación de compuestos orgánicos volátiles utilizando catalizadores bimetalicos soportados en óxidos de cerio y de titanio.
- b) Financiados por la UNAM ya sea en convocatorias del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) o del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME): i) Modificación superficial de semiconductores con nanopartículas metálicas como fotocatalizadores para producción de hidrógeno y degradación de contaminantes orgánicos; ii) Desarrollo de nanomateriales fotocatalíticos para la degradación de contaminantes en agua; iii) Desarrollo de curso-taller de cromatografía de líquidos con espectrometría de masas como apoyo a la enseñanza para los laboratorios de Química Analítica de la Facultad de Química.
- c) Financiados por la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México: i) Diseño, prueba de concepto y construcción de un sistema fotocatalítico a escala piloto para la purificación del agua de suministro en escuelas de la Ciudad de México.

Durante los últimos 10 años se han desarrollado cerca de una veintena de proyectos concluidos satisfactoriamente, entre los más relevantes se pueden

mentar: el (mega)proyecto universitario de nanotecnología ambiental (PUNTA), financiado por la UNAM, así como otros proyectos financiados por la UNAM, el CONACYT o por empresas que han llevado por título: Estudio fisicoquímico de nanopartículas Au-M soportadas para su uso en catálisis ambiental; Catalizadores bimetalicos soportados en óxidos reducibles para reacciones de oxidación total y purificación de hidrógeno; Estudio de catalizadores Au-Cu y Au-Ir para reacciones de purificación de hidrógeno (PROX y WGS); Estudio exploratorio para la obtención de nanopartículas metálicas sobre silicoaluminatos nanoestructurados con propiedades conductoras de electricidad y catalíticas, estabilización de nanopartículas Au-M soportadas en óxidos mixtos y dopados para su uso como catalizadores en reacciones de interés ambiental; actualización de equipo de catálisis heterogénea: aplicaciones en degradación de contaminantes orgánicos; catalizadores bimetalicos a base de nanopartículas de oro para reacciones de abatimiento de la contaminación atmosférica; estudio fisicoquímico de nanopartículas de oro, plata y cobre soportadas para su uso en catálisis ambiental; preparación de nanopartículas de metales del grupo IB soportadas, como catalizadores para producción de hidrógeno; preparación de nanopartículas de oro soportadas para aplicaciones catalíticas y de sensado de gases; catalizadores dendriméricos. Una visión nanoestructurada y heterogenizada; nanosistemas catalíticos. Síntesis alternativas a los métodos coloidales; síntesis y caracterización de nanopartículas de Ir(0) en ausencia de disolventes y su interacción con dendrones base triazina de generación cero; compositos con nanopartículas metálicas de metales del grupo del platino y dendrimeros de generaciones pequeñas. Sus aplicaciones catalíticas; entre otros.

En su conjunto, el desarrollo de estos proyectos ha generado cerca de 100 artículos publicados en revistas indizadas, la obtención de una patente en México, más de 50 tesis concluidas en todos los niveles académicos, el desarrollo de 6 estancias posdoctorales, el desarrollo de más de 20 estancias tanto de profesores visitantes (en su mayoría extranjeros) o de los académicos del CCADET en laboratorios externos, cerca de 200 presentaciones en congresos tanto nacionales como internacionales y un número importante de acciones de apropiación social del conocimiento, como entrevistas en diferentes medios impresos y electrónicos, artículos de divulgación, participación en ferias, foros, entre otros.

Colaboraciones con instituciones nacionales e internacionales

Los académicos que realizan investigación en catálisis en el CCADET colaboran o han colaborado con investigadores de diferentes entidades de la UNAM como el Instituto de Física, el Instituto de Ingeniería, el Instituto de Investigaciones en Materiales, el Instituto de Química, el Instituto de Ciencias Nucleares, el Instituto de Geología, el Centro de Nanociencias y Nanotecnología.

logía y las Facultades de Química, de Estudios Superiores Iztacala y de Estudios Superiores Cuautitlán; también colaboran con investigadores o profesores de Instituciones de Educación Superior o Centros de investigación en México, como la Universidad Autónoma Metropolitana, la Universidad Autónoma de Nuevo León, el Instituto Potosino de Investigaciones Científicas y Tecnológicas y el Instituto Politécnico Nacional, así como con universidades y centros de investigación en el extranjero, entre los que destacan las Universidades de Purdue y Texas Christian en los Estados Unidos de América; el Laboratorio de Reactividad de Superficies, Universidad París VI-CNRS y la Universidad de Toulouse, en Francia; las Universidades de Milán y Messina en Italia; la Academia Búlgara de Ciencias; la planta solar de Almería-CIEMAT en España; y el Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC), de la Universidad Nacional del Litoral-CONICET, en Argentina.

Infraestructura disponible para la realización de actividades de investigación desarrollo o innovación en catálisis

Entre el equipamiento más destacado con que cuenta el Grupo de Materiales y Nanotecnología, el Laboratorio Universitario de Nanotecnología Ambiental (LUNA) y el Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica (LUCE) se puede mencionar:

- Dos sistemas de microrreacción en fase gas (*in situ* research, RIG-150) provistos de reactores de cuarzo acoplados a unidades de cromatografía de gases y espectrometría de masas (figura 3).
- Dos sistemas de fotorreacción para degradación de compuestos orgánicos (fármacos, plaguicidas, plasticidas) e inorgánicos presentes en aguas.
- Un sistema de evaluación fotocatalítica de nanocatalizadores para producción de hidrógeno mediante la ruptura de la molécula de agua (*water splitting*) adaptado para realizar fotosíntesis artificial (figura 4).
- Un cromatógrafo de líquidos Agilent Technologies 1260 con detector de arreglo de diodos, acoplado a un detector de masas con triple cuadrupolo Agilent Technologies 6420 y con fuentes de ionización por electrospray (ESI) o ionización química a presión atmosférica (APCI) (figura 4).
- Un analizador de carbono orgánico e inorgánico y nitrógeno total en muestras líquidas y sólidas Shimadzu.
- Cromatógrafo de gases acoplado a masas, marca Shimadzu.
- Un extractor con fluidos supercríticos (o extractor acelerado con disolventes, ASE) marca Dionex.

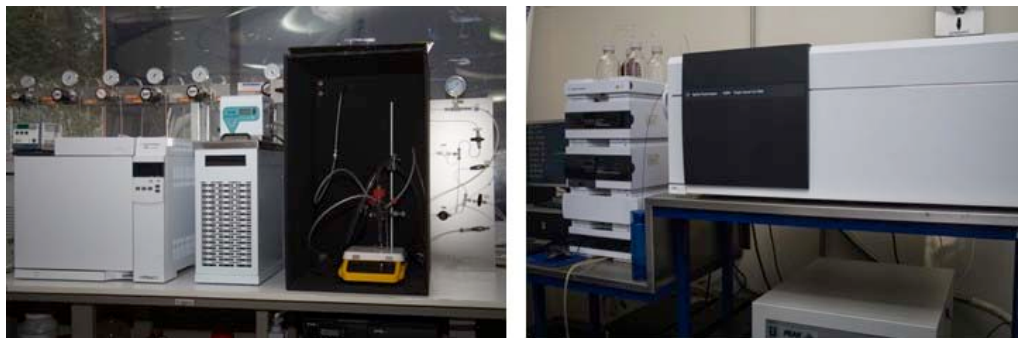


FIGURA 4. Sistema de evaluación fotocatalítica de nanocatalizadores para producción de hidrógeno mediante la ruptura de la molécula de agua y cromatógrafo de líquidos acoplado a un detector de masas con triple cuadrupolo.

- Equipos de espectroscopías infrarroja, Raman, UV-vis-NIR, fluorescencia, acoplados a celdas de temperatura y atmósfera controlada para llevar a cabo experimentos *in situ*.
- Un microscopio de fuerza atómica acoplado a espectrómetro Raman.
- Un equipo de fisisorción para determinación de área específica y porosidad en sólidos.
- Sondas de ultrasonido de alta potencia para procesos de sonoquímica.
- Sistemas de síntesis para materiales sensibles a oxígeno y agua (tren de disolventes, líneas dobles de vacío-nitrógeno; caja de guantes).
- Equipo portátil de RMN para protón (^1H).
- Laboratorios especializados para preparación de catalizadores sólidos por vía química, dotados con campanas de flujo laminar y de extracción, sondas de ultrasonido, rotavapores, hornos, muflas, medidores de pH, microbalanzas, reactores por lotes para alta presión, reactores de doble pared, sistema de recirculación de agua para calentamiento de reactores, material de vidrio diverso, entre otras facilidades.

Adicionalmente, en el CCADET se encuentra el Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva, Digitalización 3D y Tomografía Computarizada (MADiT), líder en su campo en México, con varios equipos de manufactura aditiva para polímeros termoplásticos, dos equipos para resinas fotopolimerizables y un equipo para *vacuum casting* para resinas, un equipo para impresión en metal, y uno más para biomateriales; escáneres 3D de baja, media y alta resolución, así como uno con capacidad de digitalización de textura y color; un equipo de manufactura aditiva por estereolitografía y un tomógrafo industrial computarizado, entre otros. Varios de estos equipos pueden ser empleados para “imprimir” catalizadores con formas y tamaños específicos, según los requerimientos de cada una de las reacciones estudiadas.

Principales logros en el área de catálisis

El principal logro ha sido la formación de recursos humanos de licenciatura y posgrado en el área de catálisis, así como la generación de conocimiento nuevo reflejado en la publicación de artículos de investigación, en varios casos con trascendencia nacional e internacional. Entre los principales logros científicos se puede destacar la síntesis de nuevos catalizadores heterogéneos por métodos en fase química y el estudio de los mecanismos de depósito e interacción entre los precursores metálicos y los soportes, la formación de las nanopartículas y los parámetros que influyen en su forma, tamaño e interacción con el soporte. Desarrollo de catalizadores eficientes, estables y durables en varias reacciones de abatimiento de la contaminación atmosférica, producción y purificación de hidrógeno, degradación y mineralización de contaminantes orgánicos presentes en las aguas de los efluentes residenciales, agrícolas e industriales entre los que se pueden mencionar antibióticos como el ciprofloxacino, el sulfametoxazol y la trimetoprima, herbicidas como la atrazina y el plastificante bisfenol A. Los materiales fotocatalíticos mostraron ser activos bajo irradiación de tipo UV y luz solar simulada, así como en reacciones de química fina, todas ellas de interés estratégico para el país, utilizando métodos de síntesis sencillos, eficientes y escalables industrialmente. En algunas de las reacciones fotocatalíticas estudiadas se ha logrado elucidar los mecanismos de degradación fotocatalítica a través de la determinación de los subproductos de degradación.

El desarrollo de métodos de preparación de varios sistemas bimetálicos basados en oro, entre los que se pueden mencionar Au-Ag, Au-Cu, Au-Ir, Au-Ni, Au-Co, Au-Ru, los que en todos los casos han mostrado propiedades interesantes en reacciones de oxidación ya sea total o selectiva. En la figura 5 se muestran imágenes de algunas de las formulaciones de catalizadores sintetizados en el CCADET. Los resultados obtenidos en la síntesis de catalizadores heterogéneos basados en nanopartículas de oro soportadas en óxidos, con aplicaciones a nivel ambiental, industrial y energético han tenido un impacto destacado en la comunidad científica nacional e internacional. En todos estos sistemas se ha tratado de entender el arreglo atómico en la superficie de los metales, mismo que se ha correlacionado con la actividad catalítica, concluyéndose que el segundo metal (diferente al oro) juega un papel esencial en la activación del oxígeno en las reacciones de oxidación en fase gas que han sido estudiadas.

Perspectivas sobre el estudio de la catálisis

Las eficiencias catalíticas y fotocatalíticas pudieran incrementarse si se perfeccionan las condiciones de síntesis de los materiales catalíticos, para optimizar los tamaños, las morfologías, las composiciones y la interacción me-

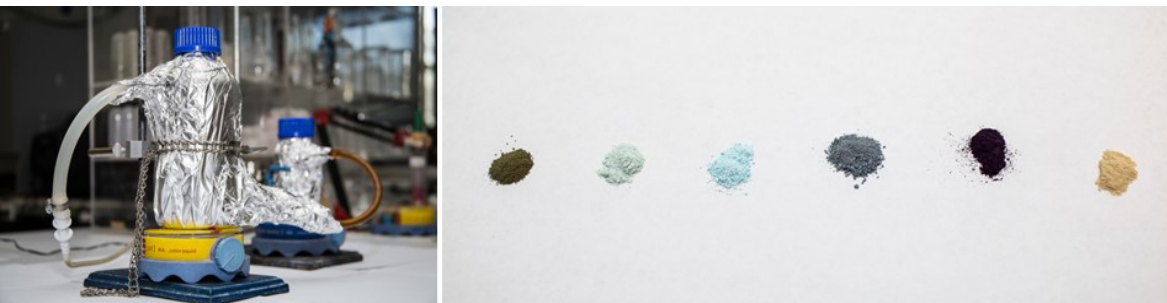


FIGURA 5. Reactores de doble pared utilizados para la síntesis de los catalizadores e imágenes de diferentes formulaciones de catalizadores tanto monometálicos como bimetálicos.

tal-sustrato. En algunos casos, los procesos de impresión 3D pudieran jugar un papel importante en el desarrollo de ciertos catalizadores con morfologías o formas específicas, que pudieran resultar favorables para incrementar la eficiencia de ciertos procesos.

Otra de las perspectivas dentro de las áreas de trabajo que se cultivan en el CCADET es el desarrollo de catalizadores multimetálicos, en los que se traten de modular funciones específicas, para favorecer características como actividad, selectividad o estabilidad, así como la realización de estudios *in situ* y *operando* para tratar de elucidar los sitios activos en los catalizadores heterogéneos multimetálicos.

La investigación en fotocatalisis para la remoción de contaminantes en agua y aire en el futuro cercano deberá perfilarse hacia el desarrollo de sistemas de semiconductores activos en el espectro de luz visible, para ser empleados en plantas solares. Una de las tendencias será el desarrollo de esquemas Z, acoplados a mediadores eficientes de electrones, tales como el grafeno reducido. También se observa interés en el desarrollo de catalizadores y fotocatalizadores basados en compositos binarios o ternarios; en el caso de la fotocatalisis heterogénea, se prevé una incursión en la preparación de semiconductores funcionalizados con moléculas orgánicas, algunas de ellas pirrólicas. Una importante perspectiva en el tema del tratamiento de agua es el escalamiento de los sistemas fotocatalíticos, ello desde dos enfoques: a) degradación de contaminantes mediante fotocatalisis heterogénea en agua compleja, tal como el agua residual tratada o aguas naturales, y, b) tratamiento de volúmenes importantes de agua en sistemas de reacción continuos o semicontinuos.

Otra de las tendencias actuales es el desarrollo de sistemas eficientes que provoquen baja o nula contaminación ambiental; así, una de las perspectivas pudiera ser el desarrollo de nuevos procesos biocatalíticos, o sistemas en los que los catalizadores sean fácilmente recuperables, por ejemplo, a través de procesos magnéticos.

Sitios de Interés del CCADET relacionados con el tema

- Página institucional:
<www.ccadet.unam.mx>
- Laboratorio Universitario de Nanotecnología Ambiental:
<<http://www.luna.ccadet.unam.mx>>
- Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica:
<<http://www.luce.ccadet.unam.mx>>
- Grupo de Materiales y Nanotecnología
<<http://www.ccadet.unam.mx/secciones/depar/sub3/matena/nano.html>>
- Google maps
<goo.gl/Hru5pG>
- Facebook
<www.facebook.com/CCADET.mx>
- Twitter
<twitter.com/ccadetunam>

Catálisis en Baja California

J. Noé Díaz de León,* Luz A. Zavala-Sánchez*

RESUMEN: Este artículo tiene como objetivo mostrar la investigación en materia de catálisis llevada a cabo en Baja California, México. Se describen los centros de investigación y universidades que aportan conocimiento por medio de proyectos de ciencia básica, así como de innovación tecnológica en dicho tema. Se mencionan las diferentes líneas de investigación en catálisis desarrolladas por los investigadores de la región. Además, se destaca la investigación llevada a cabo en Ensenada, como ciudad del conocimiento, por contar con numerosas instituciones dedicadas a la ciencia.

PALABRAS CLAVE: Catálisis, Baja California, CNYN, UABC, CICESE.

ABSTRACT: This paper aims to show the catalysis research carried out in Baja California, Mexico. It describes the research centers and universities that contribute knowledge through basic science projects, as well as technological innovation in this area. The different lines of research in catalysis that are developed by the researchers of the region are mentioned. Also, it highlights the research carried out in Ensenada, as a city of knowledge, because its many institutions dedicated to science.

KEYWORDS: Catalysis, Baja California, CNYN, UABC, CICESE.

Introducción

Los catalizadores se definen como compuestos que reaccionan químicamente pero que no son consumidos en el transcurso de la reacción.¹ Un material catalítico es aquel que ayuda a la reacción a llevarse a cabo de manera más eficiente disminuyendo la energía de activación de esa reacción. Los catalizadores heterogéneos se componen normalmente de una fase activa y un soporte que normalmente proporciona una alta superficie sobre la que se dispersa la fase activa, frecuentemente de tamaño nanométrico y, por lo tanto, la catálisis por definición es un fenómeno “nano”. En muchos casos existen otros compuestos de superficie conocidos como promotores, que mejoran las características del catalizador optimizando su dispersión (promotores estructurales), dirigiendo la selectividad e incrementando de manera considerable

Recibido: 13 de febrero de 2016. Aceptado: 31 de marzo de 2016.

* Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Km. 107 carretera Tijuana-Ensenada, C.P. 22800, Ensenada, Baja California, México. Correspondencia: J. N. Díaz De León (noejd@cnyn.unam.mx), Luz A. Zavala-Sánchez (luz_zavala@outlook.com);

¹ Tomás Cordero Alcántara y José Rodríguez Mirasol (Universidad de Málaga). Catalizadores para la protección del medio ambiente Rodríguez Jiménez, Juan José (dir.), *Hacia un uso sostenible de los recursos naturales*. Sevilla: Universidad Internacional de Andalucía, 2008. ISBN: 978-84-7993-048-6.

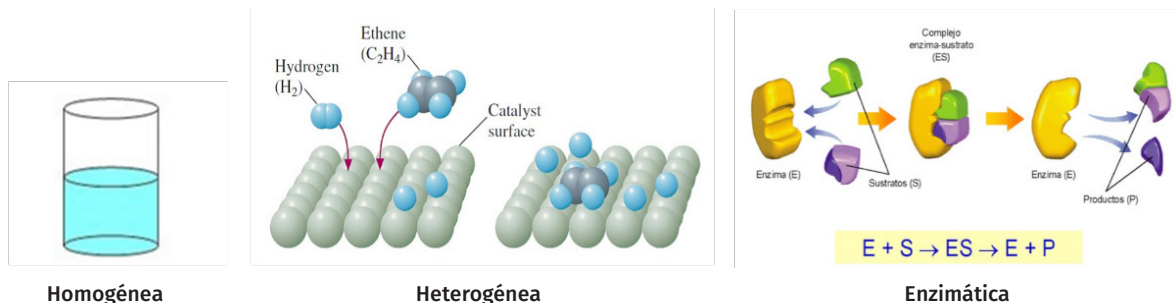


FIGURA 1. Clasificación de las reacciones catalíticas.

la actividad catalítica (promotores químicos). La catálisis puede llevarse a cabo de múltiples formas, por ejemplo: a) la catálisis homogénea, es decir, cuando los reactivos y el catalizador se encuentran en la misma fase. En este tipo de catálisis generalmente los reactivos están en un medio acuoso y los catalizadores son frecuentemente pares ácido/base; b) la catálisis heterogénea en la cual los catalizadores son sólidos usualmente porosos y los reactivos pueden estar en fase gaseosa o líquida, y, c) se encuentra la catálisis de tipo “bio” en la cual se necesita de una enzima y un sustrato afín.

La importancia de la catálisis en el mundo es el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas que contribuyan a la mejora de la calidad de vida humana y potencien la competitividad de la industria química, dentro del concepto de química sostenible. En los últimos años, el espectro de la investigación y el desarrollo de catalizadores avanzados, tanto inorgánicos como enzimáticos, han dado como resultado procesos químicos innovadores. Ya sea para mejorar los sistemas de producción existentes, reducir la producción de especies contaminantes o evitar la contaminación de los efluentes que se emiten. Las aplicaciones principales son en materia de energía, protección medioambiental y síntesis selectiva de compuestos químicos.

Baja California, punto de investigación científica e innovación tecnológica

Baja California, estado ubicado en el extremo noroeste de México, se distingue de otros estados por un modelo económico y social fructífero y punto estratégico para el intercambio de bienes, recursos humanos y conocimiento con el país vecino, Estados Unidos. La variedad étnica y su consecuente diversidad cultural son los sellos distintivos de esta zona fronteriza, donde se encuentran tres ciudades principales Ensenada, Mexicali y Tijuana. Mexicali es la capital del estado mientras que Tijuana es la ciudad más grande de la entidad; esta singular característica ha dado origen a profundos fenómenos sociales cuyos efectos y manifestaciones son continuamente estudiados en

prestigiadas instituciones mexicanas y estadounidenses. Más que un estado que marque diferencias es un punto de unión entre culturas.

Entidades en las que se realiza investigación en Baja California

Ensenada es actualmente la ciudad con más científicos por habitante de México² y ha sido declarada recientemente como Ciudad del Conocimiento.³ En Baja California existe una gran variedad de instituciones educativas con una muy diversa oferta. Por ejemplo, a nivel posgrado, hay dos centros del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT): el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y el Colegio de la Frontera Norte (COLEF), de entre ellos el primero ha sido catalogado como el centro CONACYT más grande de México. Tijuana cuenta con el Centro de Graduados e Investigación en Química del Instituto Tecnológico de Tijuana (CGIQ-ITT) y el Centro de Investigación en Tecnología Digital (CITEDI), el cual es una unidad del Instituto Politécnico Nacional (IPN). En Ensenada, se ubican el Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNyN) y el Instituto de Astronomía (IA-UNAM), ambos dependientes de la Universidad Nacional Autónoma de México. Además de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC).

FIGURA 2. Ubicación de las principales ciudades de Baja California y su escudo.



² «Biotecnología – Invest in Baja». <www.investinbaja.gob.mx>.

³ «Ensenada, Ciudad del Conocimiento – El Vigía».



FIGURA 3. Instituciones que tienen programas de posgrado en Baja California.

Oferta educativa

Los programas de licenciatura y posgrado constituyen un esfuerzo por ampliar la oferta educativa con el propósito de atender las necesidades y participar en la búsqueda y generación de conocimiento nuevo no sólo para el país, sino para la comunidad internacional.

En Baja California se cuenta con siete programas académicos para licenciatura, maestría y doctorado. Cinco de ellos impartidos en la ciudad de Ensenada, en el CNyN, UABC Campus Ensenada y CICESE.

- Licenciatura en nanotecnología (CNyN, UNAM).
- Ingeniería en nanotecnología (UABC).
- Posgrado en ciencia e ingeniería de materiales (CNyN, UNAM).
- Posgrado en ciencias físicas (CNyN, UNAM).
- Posgrado en nanociencias (CICESE-CNyN-UNAM).
- Maestría y doctorado en ciencias e ingeniería (UABC Campus Ensenada, Tijuana y Mexicali).
- Maestría y doctorado en ciencias en químicas (CGIQ-ITT).

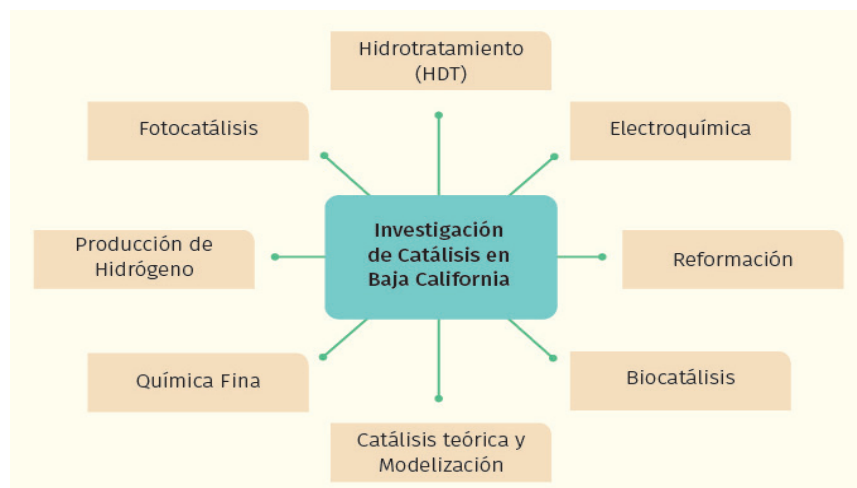
Debido a esta gran diversidad de instituciones también se cuenta en Baja California con el Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología (COCYT) que promueve programas de desarrollo interinstitucionales procurando la vinculación y el compromiso de pensamiento y colaboración entre industrias, universidades y gobierno. Este organismo estableció el Premio Estatal de Ciencia y Tecnología que se otorga de manera anual como un reconocimiento público al trabajo realizado de manera individual o colectiva por científicos o tecnólogos bajacalifornianos o residentes en la Entidad.

Entre las principales aportaciones de los grupos de investigación existentes en la región de Baja California, se cuenta con el desarrollo de la preparación de nanomateriales y nanoestructuras utilizando técnicas sofisticadas de síntesis. Esta disciplina tiene un gran espectro de aplicaciones energéticas y ambientales, como son el desarrollo de catalizadores para motores de autos y nanotubos para almacenamiento de hidrógeno. En el ámbito de la catálisis existen muy variadas líneas de investigación en materiales, por ejemplo, para fotocatalisis, electroquímica, hidrotratamiento, producción de hidrogeno y energías limpias, química fina, reformación, deshidratación de alcoholes, biocatálisis, así como el estudio de catálisis teórica y modelamiento (figura 4).

Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM

El CNyN (antes Centro de Ciencias de la Materia Condensada) de la UNAM ha enfocado su esfuerzo en el estudio de la materia a nivel atómico, evolucionando hacia la modificación de la misma logrando crear una gran diversidad de nanoestructuras con diferentes morfologías aplicadas a catalizadores nanoestructurados de aleaciones metálicas. Las actividades en el CNyN se lle-

FIGURA 4. Líneas de investigación en materia de catálisis en Baja California.



van a cabo en diferentes departamentos, como son los de Bionanotecnología, Física, Fisicoquímica de Nanomateriales, Materiales Avanzados, Nanocatálisis, y Nanoestructuras, y los laboratorios especializados de apoyo a la investigación. Actualmente, el Departamento de Nanocatálisis cuenta con nueve académicos y dieciocho alumnos de licenciatura y posgrado; está compuesto por los doctores Amelia Olivas Sarabia, Felipe Castellón Barraza, Trino Armando Zepeda Partida, Vitalli Petranovskii, Sergio Fuentes Moyado, Andrey Simakov, Erick Flores Aquino, Takeshi Ogawa Murata y Jorge Noé Díaz de León Hernández. Cada uno con líneas de investigación bien definidas que se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Miembros del Departamento de Nanocatálisis del cny n y sus líneas de investigación.

INVESTIGADOR	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
Amelia Olivas Sarabia	Síntesis de materiales catalíticos para reacciones de CO y su caracterización fisicoquímica.
Felipe Castellón Barraza	Síntesis de catalizadores de tres vías de Pd (Pd-TWC). Catalizadores para transformación de CO, catalizadores enzimáticos y deshidrogenación oxidativa de compuestos orgánicos.
Trino A. Zepeda Partida	Generación de energías limpias por medio del estudio de catalizadores para las reacciones de desplazamiento de vapor de agua (WGS), para la obtención de hidrógeno y proceso Fischer-Tropsch a partir de gases de síntesis (CO y H ₂), así como para la remoción de azufre de cortes petroleros.
Vitalli Petranovskii	Síntesis y estudio de las propiedades físicas-químicas y estructurales de cúmulos de metales en las zeolitas.
Sergio Fuentes Moyado	Química, cinética y catálisis en ingeniería química, refinación del petróleo, petroquímica, fisicoquímica de superficies y nanotecnología. Su línea más importante es el estudio de materiales en estado sulfuro para diversas aplicaciones.
Andrey Simakov	Desarrollo de nuevos catalizadores heterogéneos para la protección del medio ambiente, diseño de procesos novedosos en biocatálisis y biotecnología, investigación de la cinética y de los mecanismos cinéticos de catálisis heterogénea con aplicación de técnicas experimentales avanzadas como <i>in situ</i> y <i>operando</i> .
Takeshi Ogawa Murata	Síntesis y modelado molecular de los catalizadores basados en complejos de polímeros hiperramificados con metales de transición. El estudio del efecto dendrimérico sobre diferentes catalizadores.
Jorge Noé Díaz de León Hernández	Preparación, caracterización y evaluación catalítica de soportes y catalizadores para la producción de diésel de ultra-bajo azufre. Desarrollo de nanomateriales 1D de óxidos de metales típicos. Desarrollo de infraestructura para la evaluación catalítica de materiales de hidrotratamiento a escala micro y piloto bajo condiciones industriales, así como materiales para la deshidratación catalítica de alcoholes.

A su vez, el Dr. Sergio Fuentes preside el grupo de investigación en sulfuros al que están asociados los doctores Trino A. Zepeda, Vitalli Petranovskii, Jorge Noé Díaz de León y Gabriel Alonso-Núñez del Departamento de Nanoestructuras. Los académicos invitados Dra. Elena Smolentzeva y Dra. Yulia Kotolevich, los doctores Brenda Acosta, Joel Antúnez, Miguel Estrada y Joel Rojas quienes están realizando sus estancias posdoctorales. Cabe mencionar que el doctor Sergio Fuentes (figura 5) obtuvo en 2016 el Premio de Ciencia y Tecnología del estado de Baja California, el Premio a la Trayectoria Científica de la Federación Iberoamericana de Sociedades de Catálisis (FISOCAT) y fue nombrado secretario de la International Association of Catalysis Societies (IACS).



FIGURA 5. Profesor Sergio Fuentes Moyado.

Además de los integrantes del Departamento de Nanocatálisis que se dedican enteramente al tópico de este trabajo, los doctores Rafael Vázquez Duhalt, Nina Bogdanchikova, Karla O. Juárez Moreno, Homero Galván Martínez, Sergio Águila Puentes y Gabriel Alonso Núñez pertenecientes a otros departamentos del CNYN, también realizan investigaciones relacionadas con catálisis. Algunas de sus líneas de investigación se detallan en la tabla 2.

Tabla 2. Miembros del CNYN en otros departamentos que desarrollan investigación en catálisis.

INVESTIGADOR	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
Rafael Vázquez Duhalt	Bioteología ambiental. Degradación biocatalítica de contaminantes con motores autopropulsados de liberación enzimática.
Nina Bogdanchikova	Oxidación de propeno y propano, oxidación de CO, así como el estudio de las propiedades fisicoquímicas de nano partículas y cúmulos de plata y oro.
Karla O. Juárez Moreno	Biocatálisis enzimática.
Homero Galván Martínez	Modelado cuántico para catálisis.
Sergio A. Águila Puentes	Biocatálisis, la inmovilización de enzimas en soportes nanoestructurados. Estudios biocatalíticos de enzimas oxidoreductasas. Diseño de nanopartículas pseudovirales con actividad biocatalítica.
Gabriel Alonso Núñez	Síntesis y caracterización de nanoestructuras de metales nobles y nanotubos de carbón con aplicación en catálisis y electroquímica. Síntesis y caracterización de sulfuros de metales de transición (MoS_2 , ReS_2 , RuS_2 y WS_2) con aplicación en reacciones de HDS de compuestos azufrados, desarrollo de nuevos materiales nanoestructurados como: nanotubos de carbono, óxidos (TiO_2 y SiO_2) y metales nobles (Pt, Rh, Pd, Au, Ru) con aplicación en celdas de combustible de intercambio iónico.



FIGURA 6. a) Reactor continuo de cama empacada para reacciones de hidrodesulfuración; b) reactor para reacciones de Fischer-Tropsch, reformación y desplazamiento de vapor de agua, y, c) planta piloto para evaluaciones a escala de banco tipo Vinci.

Se debe destacar que en conjunto los académicos del CNYN que mantienen líneas de investigación en catálisis han logrado publicar en 2016 más de 70 artículos en revistas indizadas de alto impacto. Con lo cual contribuyen al desarrollo de la catálisis en México de manera activa.

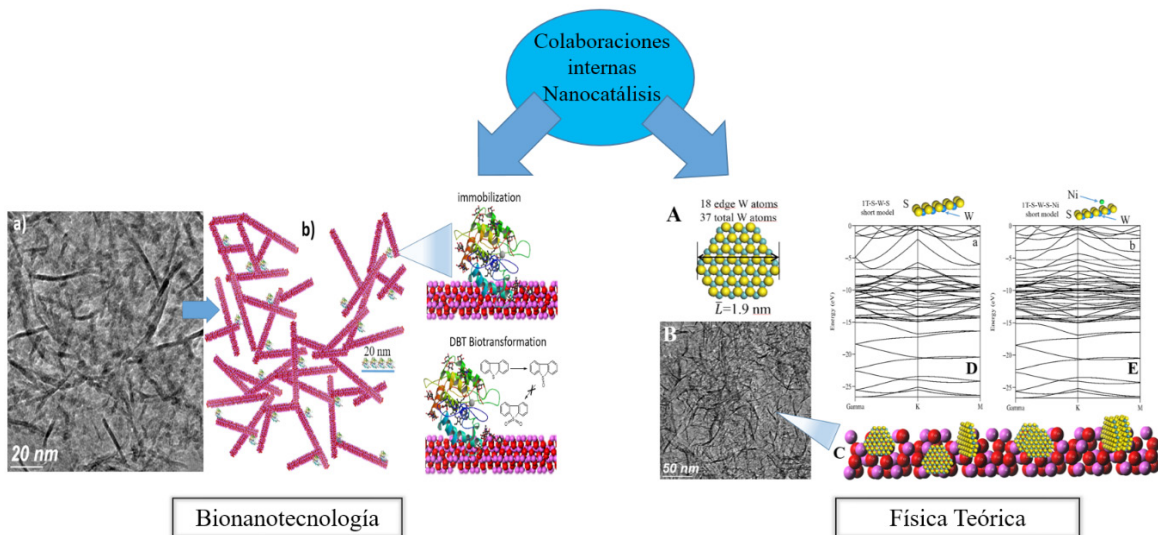
La infraestructura con la que cuenta el CNYN fue enumerada previamente en el trabajo de Barberena y colaboradores,⁴ pero además, para el desarrollo de las investigaciones en catálisis se cuentan con reactores especializados para pruebas cinéticas de materiales. Existen varios reactores por lotes tipo Parr, un reactor de flujo continuo para las reacciones de Fischer-Tropsch, reformación y desplazamiento de vapor de agua, un reactor de flujo continuo descendente en fase gas para reacciones de deshidratación de alcoholes y desulfuración de moléculas modelo tipo gasolina a presión atmosférica. Un reactor trifásico de cama empacada para hidrodesulfuración de moléculas modelo tipo diésel y cargas reales. Un reactor para hidrogenaciones selectivas y un reactor para oxidación de CO, entre otros. Cabe mencionar que con excepción de los sistemas Parr, todos los reactores fueron desarrollados por los académicos involucrados en esa línea específica de investigación. Finalmente, el centro cuenta con una planta piloto a nivel escala de banco de reciente adquisición con VINCI technologies por medio del proyecto SENER-CONACYT 117373 dirigido por el Dr. Sergio Fuentes. Misma que puede ser utilizada para evaluación de prototipos de catalizadores industriales en reacciones de remoción ultra-profunda de moléculas azufradas presentes en cargas reales tipo diésel, hidrogenación selectiva de compuestos aromáticos, hidrogenación, hidrodemetalización, hidrodeoxigenación, entre otras.

⁴ Centro de Nanociencias y Nanotecnología-UNAM, Irene Barberena Rojas, Oscar Edel Contreras López y Leonardo Morales de la Garza, *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, vol. 9, núm. 16, enero-junio, 2016, 30-48.

La colaboración científica constituye un aspecto esencial en la actividad profesional de los investigadores del CNYN. Entre otros beneficios, la cooperación permite alcanzar de forma más rápida y eficiente un fin común; incluso puede ser en ocasiones la única forma para alcanzarlo. En los últimos años se ha intensificado hasta tal punto la especialización del conocimiento y los recursos necesarios para abordar los problemas de la investigación, que hacen de la misma un factor indispensable.⁵ De esta manera el grupo de Nanocatálisis mantiene una estrecha colaboración al interior del CNYN con diferentes departamentos como el de Bionanotecnología⁶ o física teórica⁷ (ver figura 7).

Asimismo, los investigadores del CNYN mantienen una amplia colaboración con instituciones locales y nacionales, así como otros centros e institutos de la UNAM. En el esquema de la figura 8 se muestran algunas de las colaboraciones que mantienen los investigadores que desarrollan catálisis en CNYN con instituciones nacionales.

FIGURA 7. Trabajos publicados por miembros del Departamento de Nanocatálisis en colaboración interna con otros departamentos del CNYN. Izq. (véase nota 6), Der. (véase nota 7).



⁵ González Alcaide, G., Gómez Ferri, J. (2014). La colaboración científica: principales líneas de investigación y retos de futuro. *Revista Española de Documentación Científica*, 37 (4): e062 doi: <http://dx.doi.org/10.3989/redc.2014.4.1186>.

⁶ Karla Juárez-Moreno, J. Noé Díaz de León, Trino A. Zepeda, Rafael Vazquez-Duhalt, Sergio Fuentes. (2015). Oxidative transformation of dibenzothiophene by chloroperoxidase enzyme immobilized on (1D)- γ - Al_2O_3 nanorods. *Journal of Molecular Catalysis B Enzymatic*, 115, 90-95.

⁷ J. N. Díaz de León, T.A. Zepeda, G. Alonso-Núñez, D.H. Galván, B. Pawelec y S. Fuentes. (2015). Insight of 1D γ - Al_2O_3 nanorods decoration by NiWS nano-slabs in ultra-deep hydrosulfurization catalysts. *Journal of Catalysis*, 321, 51-61.

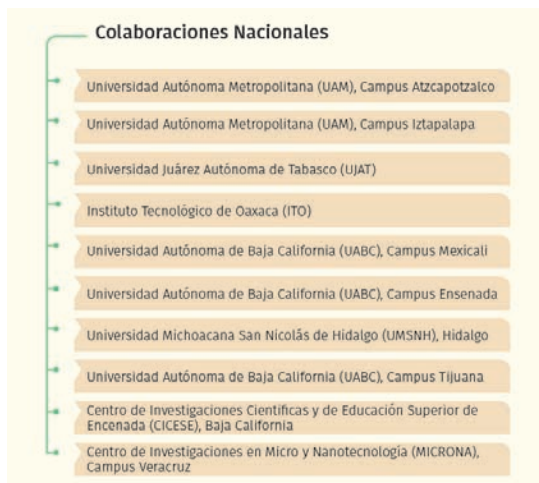


FIGURA 8. Colaboraciones del Departamento de Nanocatálisis con instituciones nacionales.

De la misma forma, las líneas de investigación sobre catálisis les han permitido a los investigadores mantener una intensa vinculación con instituciones de alto prestigio en el extranjero, con el objetivo no sólo de estancias académicas sino también de la transferencia de tecnología y conocimiento a nuestro país. Algunas de las instituciones con las que actualmente se tiene vinculación se enumeran en el esquema de la figura 9.

FIGURA 9. Colaboraciones del Departamento de Nanocatálisis con instituciones internacionales.



Uno de los ejemplos más recientes de transferencia de tecnología es la implementación de una cámara de vacío para transferencia de materiales en estado sulfuro para su análisis *in-situ* y caracterización por medio de espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS). Misma que fue realizada en colaboración con el Instituto de Investigación en Catálisis y Medio Ambiente de Lyon, Francia, en una estancia realizada por la M. en C. Luz Zavala-Sánchez con el Dr. Luis Cárdenas como parte de su participación en el proyecto SENER-CONACYT 117373.

Universidad Autónoma de Baja California

En el caso de la UABC los inicios de la investigación científica en cuanto a catálisis se remontan a la creación de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería UABC-Tijuana, que fue fundada el 18 de febrero de 1974 y que durante nueve años ofreció sólo el programa de licenciatura en química. En el año de 1983 se aumentó la oferta educativa, ofreciendo ahora la carrera de químico industrial y la de ingeniero químico. En 2002, la oferta educativa nuevamente crece, estableciéndose el Programa de Ingeniero Industrial. Un año después se lanza el Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería, ofrecido como plan institucional tanto en la Facultad de Ingeniería en el campus Ensenada como en Mexicali. Desde sus inicios el cuerpo de posgrado en química de materiales tiene como eje el estudio de la síntesis, caracterización y medición de la actividad catalítica de catalizadores sin soporte en las reacciones modelo de hidrotratamiento, particularmente hidrogenación del ciclohexeno y la hidrodesulfuración del dibenzotiofeno. Los académicos asociados a esta línea de investigación son los doctores Juan Cruz Reyes quien funge como líder del cuerpo académico, el Dr. José Mario del Valle Granados (figura 10) y el Dr. Raúl Romero Rivera.

FIGURA 10. De izquierda a derecha los doctores Gabriel Alonso-Núñez (CNYN-UNAM), Raúl Romero (UABC), Juan Cruz-Reyes (UABC), Hugo Tiznado (CNYN-UNAM) y Mario del Valle (UABC).



En el ámbito de las colaboraciones nacionales, los integrantes del cuerpo académico mantienen relaciones académicas con investigadores de otros centros de investigación nacionales, como son:

- Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNYN, UNAM, Ensenada, B.C.).
- Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV, Chihuahua).
- Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPCyT, San Luis Potosí).
- Destacando los siguientes académicos como colaboradores nacionales.
- Dr. Gabriel Alonso Núñez (CNYN, UNAM, Ensenada).
- Dr. Sergio Fuentes (CNYN, UNAM, Ensenada).
- Dr. Miguel Avalos Borja (IPCyT, S.L.P.).
- Dr. Francisco Paraguay Delgado (CIMAV, Chihuahua).
- Dr. Hugo Tiznado (CNYN, UNAM, Ensenada).

Del mismo modo, en el campus Ensenada se lleva a cabo catálisis por parte de la Dra. Eunice Vargas Viveros. Algunas de las líneas de investigación desarrolladas por los investigadores mencionados se detallan en la tabla 3.

Centro de Graduados e Investigación en Química del Instituto Tecnológico de Tijuana

En el Centro de Graduados se encuentran los doctores Edgar Reynoso Soto, Yadira Gochi, Mercedes Teresita Oropeza Guzmán y Rosa María Félix Navarro. Los temas de investigación que desarrollan en cuanto a catálisis son muy variados, pero principalmente se dedican al desarrollo de materiales para fo-

Tabla 3. Miembros de la UABC que desarrollan investigación en catálisis.

INVESTIGADOR	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
Juan Cruz Reyes	Síntesis y caracterización de sulfuros bimetalicos con estructura tipo grafeno de interés catalítico. Síntesis de catalizadores sin soporte en las reacciones modelo de HDT, particularmente: hidrogenación del ciclohexeno e hidrodesulfuración del dibenzotiofeno.
Mario del Valle Granados	Síntesis de catalizadores sin soporte en las reacciones modelo de HDT. Hidrodesulfuración de compuestos azufrados con sulfuros y catalizadores derivados de tiometalatos de aminas cuaternarias.
Eunice Vargas Viveros	Síntesis y aplicación de nanopartículas de oro dispersadas en óxidos metálicos para reacciones de oxidación de CO, reacción de desplazamiento de vapor de agua (WGS) y oxidación selectiva de compuestos orgánicos.

tocatálisis, electrocatálisis y remediación de efluentes. Algunas de sus líneas de investigación se detallan en la tabla 4.

Por último, los autores quisieran expresar su agradecimiento a los académicos que colaboraron con este trabajo, mencionando de manera escrita o verbal sus áreas de interés, colaboraciones y sus líneas de investigación. Asimismo, queremos invitar a los académicos que hacen investigación en catálisis radicados en el estado de Baja California y que no fueron mencionados en esta recopilación, a que se comuniquen con nosotros para considerarlos en futuros trabajos, así como para invitarlos a formar parte de la Académica de Catálisis México (ACAT).

Tabla 4. Miembros del Centro de Graduados e Investigación en Química que desarrollan investigación en catálisis.

INVESTIGADOR	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
Edgar Reynoso Soto	Síntesis, caracterización y aplicación de nanomateriales. Los proyectos en los que está desarrollando su investigación se enfocan a la síntesis de nanoestructuras de carbono, nanopartículas metálicas y bimetalicas, así como la síntesis de dióxido de titanio dopado con metales de transición. Desarrollo de celdas de combustible de hidrógeno y metanol, celdas solares sensibilizadas con colorantes, electrocatalizadores para la destrucción de contaminantes orgánicos, fotocatálisis heterogénea para destrucción de colorantes en medios acuosos.
Yadira Gochi	Desarrollo de nuevos materiales y dispositivos de energía, particularmente con base en la síntesis y caracterización de nanoestructuras de carbono (nanotubos y grafeno) y nanopartículas metálicas (elementos de transición) como catalizadores de reacciones químicas específicas y electrocatalizadores de celdas de combustible de membrana de electrolito polimérico, así como el estudio de materiales compuestos.
Mercedes Teresita Oropeza Guzmán	Estudio de procesos electrocinéticos aplicados a la descontaminación de suelos con metales e hidrocarburos. Innovaciones en la preparación de electrocatalizadores DSA para generación de radicales OH y oxígeno, como vía de mejora de celdas de electroflotación, electrocoagulación electrooxidación y fotoelectrooxidación.
Rosa María Félix Navarro	Síntesis de nanomateriales para aplicaciones en la detección y remoción de contaminantes del medio ambiente, detección de moléculas de interés biológico, electrocatalizadores para celdas de combustible y celdas solares. Diseño de reactores electroquímicos para la síntesis electroquímica de agentes químicos para el tratamiento de aguas. Diseño de reactores electroquímicos para la remoción de metales pesados tóxicos de soluciones acuosas. Procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de aguas.

Sitios de interés

- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
<<http://www.cicese.edu.mx>>
- Centro de Graduados e Investigación en Química del Instituto Tecnológico de Tijuana
<<http://cgiq.tectijuana.mx>>
- Centro de Nanociencias y Nanotecnología
<<https://www.cnyn.unam.mx>>
- Universidad Autónoma de Baja California
<<http://www.uabc.mx>>
- Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Baja California
<<https://sites.google.com/a/uabc.edu.mx/cisalud/convocatoria/consejo-de-ciencia-y-tecnologia-baja-california>>
- Academia de Catálisis de México
<<http://www.acat.org.mx>>

Páginas de investigadores

Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM

- Dra. Amelia Oliva Sarabia
<https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com_perfil&view=perfil&Itemid=56&uid=108&lang=en>
- Dr. Felipe Castellón Barraza
<https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com_perfil&view=perfil&Itemid=56&uid=70&lang=en>
- Dr. Trino Armando Zepeda Partida
<https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com_perfil&view=perfil&Itemid=56&uid=138&lang=en>
- Dr. Vitalli Petranovskii
<https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com_perfil&view=perfil&Itemid=56&uid=115&lang=en>

- Dr. Sergio Fuentes Moyado
<https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com_perfil&view=perfil&Itemid=56&uid=84&lang=en>
- Dr. Andrey Simakov
<https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com_perfil&view=perfil&Itemid=56&uid=125&lang=en>
- Dr. Jorge Noé Díaz de León Hernández
<https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com_perfil&view=perfil&Itemid=56&uid=143&lang=en>
- Dr. Rafael Vásquez Duhault
<https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com_perfil&view=perfil&Itemid=56&uid=167&lang=en>
- Dra. Nina Bogdanchikova
<https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com_perfil&view=perfil&Itemid=56&uid=65&lang=en>
- Dra. Karla O. Juárez Moreno
<https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com_perfil&view=perfil&Itemid=56&uid=161&lang=en>
- Dr. Homero Galván Martínez
<https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com_perfil&view=perfil&Itemid=56&uid=85&lang=en>
- Dr. Sergio Águila Puentes
<https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com_perfil&view=perfil&Itemid=56&uid=163&lang=en>
- Dr. Gabriel Alonso Núñez
<https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com_perfil&view=perfil&Itemid=56&uid=63&lang=en>

Centro de Graduados e Investigación Química del Instituto Tecnológico de Tijuana

- Dr. Edgar Reynoso Soto
<http://cgiqtectijuana.mx/?page_id=1231>
- Dra. Yadira Gochi
<http://cgiqtectijuana.mx/?page_id=1235>

- Dra. Mercedes Teresita Oropeza Guzmán
<http://cgitectijuana.mx/?page_id=735>
- Dra. Rosa María Félix Navarro
<http://cgitectijuana.mx/?page_id=739>

La catálisis en la Universidad Autónoma Metropolitana–Unidad Azcapotzalco*

Julia Aguilar Pliego**

RESUMEN: En este artículo se describe el desarrollo de la catálisis en la UAM–Azcapotzalco. Se hace mención histórica de la UAM desde su creación en 1974, asimismo, del desarrollo de la catálisis en la UAM–A en el tiempo. Se mencionaran los proyectos y las diferentes líneas de investigación que se realizan en esta institución, así como la infraestructura actual que se tiene y la docencia que se imparte en el tema y en general. Se describirán las redes, colaboraciones nacionales e internacionales referentes a la catálisis en los diferentes departamentos, áreas y grupos de investigación actuales en la UAM–A.

PALABRAS CLAVE: Catálisis, materiales micro/mesoporosos, membranas catalíticas.

ABSTRACT: The present contribution describes the research work on catalysis and catalytic materials that has been carried out and developed for a period of approximately forty years at the Metropolitan Autonomous University – Azcapotzalco (UAM–A). The Metropolitan Autonomous University was founded in 1974 and hereby we point out relevant aspects on catalysis research that have took place from that date up to present times. The description includes research projects, research fields under study, laboratory facilities, instrumentation, contribution to first degree and graduate teaching and national and international collaboration links and funding, of the different research groups affiliated to the academic departments of the Metropolitan Autonomous University – Azcapotzalco.

KEYWORDS: Catalysis, micro/mesoporous materials, catalytic membranes.

La Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) se creó en los años setenta del siglo XX, por la necesidad de ampliar la matrícula de estudiantes en instituciones de educación superior. Por tal motivo en 1974 se crea la UAM. El 11 de noviembre de 1974 la UAM–Azcapotzalco abre sus puertas, siendo su rector el Dr. Juan Casillas de León. La Universidad Autónoma Metropolitana es un organismo descentralizado del Estado con personalidad jurídica y patrimonio propio.

Su dinámica institucional está regida por una estructura orgánica encargada de la distribución y ejercicio de las funciones e incluye diversos niveles

Recibido: 23 de enero de 2016. Aceptado: 15 de marzo de 2016.

* Agradecimientos: Dr. Luis Noreña Franco, ayudante Ángel Arteaga, Dr. José Luis Contreras Larios, Dra. Deyanira Ángeles Beltrán y al Dr. Miguel Torres, por la valiosa información brindada para la realización de este documento.

** Área de Química Aplicada, Departamento de Ciencias Básicas, División de CBI–UAM–Azcapotzalco. Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, C.P. 02200, Delegación Azcapotzalco, Cd. Mx., México. Correspondencia: (apj@azc.uam.mx).



FIGURA 1. Imagen de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.

de participación de la comunidad universitaria. Uno de los componentes de dicha estructura son los Órganos Colegiados. Cabe mencionar que, actualmente, la UAM cuenta con uno de los sistemas de admisión más avanzados de Latinoamérica.

La UAM–Azcapotzalco (figura 1), abrió sus puertas a la comunidad universitaria el 11 de noviembre de 1974. Por su ubicación, al norte de la Ciudad de México y la decisión inicial de orientarla hacia las necesidades prácticas de la sociedad circundante, la Unidad se inscribe en un modelo de transmisión del conocimiento centrado primordialmente en problemas concretos, así como en el estudio puro de las disciplinas.

Desde el inicio de sus actividades, dirige sus esfuerzos a desarrollar un proyecto educativo que la ubica como una de las alternativas de educación superior más sólidas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y del país, por generar opciones de calidad para todos los miembros de la comunidad universitaria.

En esta Unidad se forma a profesionistas en tres Divisiones:

- Ciencias Básicas e Ingenierías.
- Ciencias Sociales y Humanidades.
- Ciencias y Artes para el Diseño.

Los programas de posgrado en sus diferentes niveles (especialización, maestría y doctorado) se dirigen a formar investigadores, profesionales y profesores de alto nivel académico que, en distintas áreas del conocimiento, respondan a las necesidades sociales de acuerdo con las condiciones del desenvolvimiento histórico.

Es por ello que constantemente se actualizan la docencia y los planes y programas de estudio, situación posible gracias al papel fundamental de la investigación que se realiza en la Unidad.

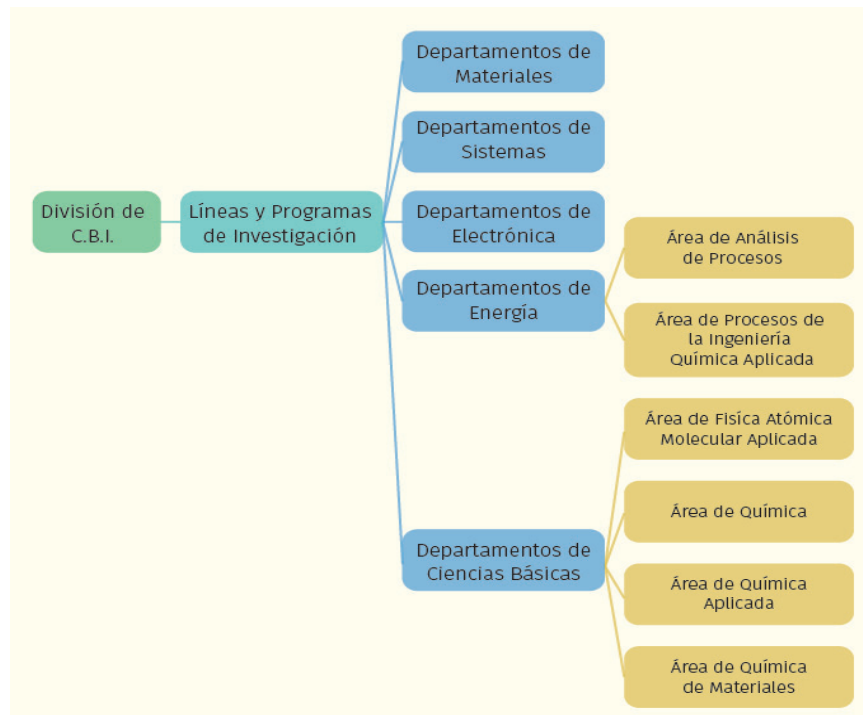
La División de Ciencias Básicas e Ingeniería está integrada por 5 departamentos académicos, y éstos por 30 áreas de investigación y 13 cuerpos académicos. El Departamento de Ciencias Básicas cuenta con 180 profesores de los cuales 20 hacen investigación en catálisis (figura 2).

Líneas de investigación relacionadas con la catálisis

El origen de los primeros trabajos en catálisis fueron en 1985 en el Área de Química, la cual pertenece al Departamento de Ciencias Básicas. En aquel entonces un grupo de profesores-investigadores de esta institución decidieron establecer como uno de los temas de investigación más importantes la catálisis heterogénea sobre la identificación, caracterización fisicoquímica, modificación y evaluación de propiedades catalíticas y adsorptivas de materiales zeolíticos de origen natural.

Así, al pasar de los años, se desarrolla investigación en catálisis en diferentes áreas de investigación, tanto experimental como teóricamente.

FIGURA 2. Estructura institucional.



A continuación se mencionan las líneas de investigación que hoy por hoy se realizan actualmente en la UAM-A.

- a) *Área de Física Molecular Aplicada:*
Estructura electrónica de los materiales catalíticos. Dr. Enrique Poulain García y Dr. Oscar Olvera Neria.
- b) *Área de Química:*
Preparación, caracterización y elaboración de materiales sólidos como catalizadores en reacciones químicas.
Síntesis de materiales sólidos ácidos y básicos y su caracterización por técnicas espectroscópicas físicas y químicas.
Síntesis de materiales sólidos y su evaluación catalítica en reacciones de obtención de compuestos orgánicos con actividad biológica y/o inhibidora de la corrosión de aceros Dra. Deyanira Angeles Beltrán y Dr. Guillermo Negrón.
- c) *Área de Química Aplicada:*
Desintegración catalítica de desechos plásticos.
Materiales híbridos mesoestructurados (óxidos mesoporosos, MOF's, zeolitas) en reacciones de alto valor agregado. Dra. Julia Aguilar Pliego, Dr. Víctor D. Domínguez Soria, Dra. Virginia González Vélez.
Síntesis de membranas catalíticas para su aplicación en reacciones de hidrogenación y oxidación selectiva. Dr. Miguel Torres Rodríguez, Dra. Mirella Gutiérrez Arzaluz y Dra. Lidia Pérez López.
Oxidación de contaminantes orgánicos en fase líquida y gas mediante membranas catalíticas. Dra. Mirella Gutiérrez Arzaluz, Dr. Luis Noreña Franco.
- d) *Área de Procesos de la Industria Química:*
Producción de hidrógeno a partir de biomasa y fermentaciones. M en E. Leticia Nuño Licon, M en C. Ricardo Luna Paz.
Producción de acroleína a partir de glicerina. Dr. Jose Luis Contreras Larios, Dr. Ricardo López Medina.
Termodinámica del equilibrio en reacciones. Dr. Antonio Colín Luna, Dra. Berenice Quintana Diaz, Dr. Alfonso Espitia Cabrera.
- e) *Área de Química de Materiales:*
Síntesis, modificación y aplicación de materiales sólidos porosos a fenómenos de sorción y catálisis. Dra. Marisela Maubert Franco, Dr. Jorge Flores Moreno, Dr. Isaías Hernández Pérez.

En la división de CBI, en sus departamentos y áreas de investigación se desarrollan proyectos CONACYT:

- Reducción de NO_x y oxidación de CO por cúmulos bimetálicos pequeños Au-M (M= Ag, Ni, Pt, Pd, Rh) aislados y soportados en óxidos metálicos: teórico *ab-initio*.

- Hidrotalcitas, MCM-41 y zirconia sulfatada funcionalizados como catalizadores híbridos en la síntesis de aminoalcoholes esteroides azanucleosidos y 2-mercaptopbenzoimidazoles.

Programa para el Desarrollo Profesional Docente, para el Tipo Superior (PRODEP) con Cuerpos Académicos y Redes.

- Nanotecnología y Calidad Ambiental, donde se ha constituido una Red llamada Catálisis Ambiental.

Colaboraciones nacionales e internacionales

Los profesores-investigadores han creado colaboraciones con instituciones nacionales e internacionales, las cuales mencionamos a continuación.

A nivel nacional con la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I), con el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS, UAEM-UNAM), Instituto Politécnico Nacional (IPN), Unidad de Investigación en Catálisis (UNICAT), Facultad de Química (FQ-UNAM), Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados, S.C. (CI-MAV), Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), ALFA-IDDEAS (Grupo ALFA), Instituto de Química (IQ-UNAM).

A nivel internacional con: Instituto de Catálisis y Petroquímica (CSIC ICP-GTM) en Madrid, Instituto de Tecnología Química-Valencia (ITQ), Instituto de Nanociencias de Aragón en Zaragoza (INA), todas estas instituciones en España. En Francia con el Institut de Recherchers sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon (IRCELyon). En Brasil con la Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). En Argentina con la Universidad Nacional de San Luis (UNSL), Universidad Tecnológica Nacional en Córdoba (UTN). En Colombia, Universidad de Antioquía-Medellín (UDEA).

Como puede observarse existe un continuo intercambio de ideas y proyectos sobre catálisis en la UAM-A.

Infraestructura

Como se ha mencionado anteriormente, la investigación que se desarrolla se lleva a cabo en las diferentes áreas de investigación, en donde existen laboratorios para realizar la síntesis, caracterización y evaluación catalítica de los catalizadores. Estos laboratorios se encuentran ubicados en los edificios W(A y B), G, G-bis y O.

La síntesis y evaluación de los diferentes materiales catalíticos se hacen en laboratorios equipados con campanas de extracción, sondas de ultrasonido de alta potencia, rotavapores, hornos, estufas para secado a presión atmosférica y en vacío, medidores de pH, balanzas, recirculadores de agua, controladores de temperatura y de presión, reactores Parr, reactores diferenciales

de lecho fijo de vidrio y de acero. Bombas de vacío y parrillas de calentamiento. Reactor de microondas LabMate, Reactor de microondas CoolMate.

Asimismo, se cuenta con cromatógrafos de gases, Agilen-Varian (figura 3), con detectores FID y TCD, cromatógrafos de líquidos Waters. Cromatógrafo de gases modelo HP 5890 marca Agilent Serie II Plus con detector de masas modo impacto electrónico e ionización química. Cromatógrafo de gases 7890 con método ASTM-2887 para hidrocarburos.

Para la caracterización de los materiales sintetizados se cuenta con equipos como:

- Equipo de fisiorción y quimisorción modelo ASAP 2020 Micromeritis (figura 4).
- Analizador térmico, equipo simultáneo DSC-TGA modelo Q600 SDT, Waters-TA Instruments.
- TPD/TPO/TPR, Bel-Cat.
- Infrarojo Varian FTIR, equipados con cámara catalítica y ATR de diamante.
- Espectroscopía de plasma-ICP.
- Absorción atómica.
- Microscopio electrónico de barrido de alta resolución, SUPRA 55VP, Carl-Zeiss (figura 5).
- Difractómetro de rayos-X de polvos, Philips X'pert pro.
- Resonancia magnética nuclear de líquidos de 400 MHz Bruker.
- Programa deMon2k (Density of Montreal) .
- Cluster con 4 nodos y 8 núcleos Xeon 2.5ghz
- Programa VASP (Viena ab-initio software package).
- Máquina con 64 núcleos AMD 2.3ghz.

FIGURA 3. Laboratorio de Evaluación Catalítica, Área de Química Aplicada.





FIGURA 4. Equipo de fisiorción de nitrógeno ASAP2020, Micromeritis.



FIGURA 5. MEB, SUPRA 55VP, Carl Zeiss.

Producción científica

Para comunicar los diferentes resultados obtenidos en la investigación sobre el tema en cuestión, en las diferentes instancias de investigación se realizan artículos indizados (JCR) en revistas especializadas de alto impacto, libros especializados, capítulos de libros, y material de divulgación y patentes, estas últimas se tratarán en apartado especial.

Como ejemplo de la producción científica actual, en las áreas de investigación del Departamento de Ciencias Básicas y del de Energía en UAM-A, se listan:

Artículos

Equilibrium composition of ethanol steam reforming reaction to produce H_2 applied to Ni, Co and Pt/hydrotalcite- WO_x catalysts. (2014). J. L. Contreras, C. Tapia, G. A. Fuentes, L. Nuño, B. Quintana,, J. Salmones, B. Zeifert, I. Córdoba, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, núm. 29, Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable 16608–16618.

Efficient activity of magnesium–aluminium hydrotalcite in the synthesis of amides. (2013). Morales-Serna, J. A, Jaime-Vasconcelos, M. A., García-Ríos, E., Cruz, A., Angeles-Beltrán, D., Lomas-Romero, L., Negron-Silva, G. E., Cárdenas, J., *RSC Advances*, 3(45), 23046-23050.

Catalysts with cerium in a membrane reactor for the removal of formaldehyde pollutant from water effluent. (2016). Gutiérrez-Arzaluz, M., Noreña-Franco, L., Ángel-Cuevas, S., Múgica-Álvarez, V., Torres-Rodríguez, M. S. *Molecules*, 21, 668.

- HKUST-1 as a heterogeneous catalyst for the synthesis of vanillin. (2016). Yépez, R., Illescas, J. F., Gijón, P., Sánchez-Sánchez, M., González-Zamora, E., Santillan, R. *et al. J. Vis. Exp.*, (113), e54054, doi:10.3791/54054.
- La obtención de acroleína a partir de la deshidratación catalizada de glicerol por medio del empleo de la Teoría de Funcionales de la Densidad (Acrolein extraction from catalytic dehydration of glicerol through Density Functional Theory). (2016). V. D. Domínguez-Soria, J. Aguilar-Pliego. *Superficies y Vacío*, 29(3) 93, septiembre.
- The CO oxidation mechanism on small Pd clusters. A theoretical study. (2015). González-Torres J. C., Bertin V, Poulain E., Olvera-Neria O., *J. Mol. Model.*, 21(11): 279, noviembre, doi: 10.1007/s00894-015-2828-5.

Capítulos en libros

- L. Noreña, J. Aguilar, V. Mugica, M. Gutiérrez y M. Torres. (2012). Materials and methods for the chemical catalytic cracking of plastic waste, pp. 151-174, en *Material Recycling –Trends and Perspectives*, Intech, 406 pp., ISBN 978-953-51-0327-1.
- Juan Francisco Illescas Salinas, Julia Aguilar Pliego (UAM-A). (2015). Zeolitas y materiales mesoporosos: medicinas para el medio ambiente, en *Catálisis y Medio Ambiente*, Amazon, ISBN-13: 978-151415 4731: ISBN-10: 1514154730.

Editores de libros

- Luis Enrique Noreña, Jin-An Wang (eds.). (2016). *Advanced catalytic materials: Photocatalysis and other current trends*, InTech, 496 pp., ISBN 978-953-51-2244-9, doi 10.5772/60491.
- Julia Aguilar P., Luis Cedeño C., Martha Leticia Hernández P., (eds.). (2015). *Catálisis y medio ambiente*, Amazon, ISBN-13: 978-151415 4731: ISBN-10: 1514154730.

Instrumentos de protección de propiedad intelectual solicitados u otorgados

- WO 2015012676 A1 proceso y equipo para la producción de hidrocarburos por descomposición catalítica de desperdicios plásticos en un solo paso. Inventores; L. Noreña Franco, J. Aguilar Pliego, M. Sánchez Sánchez, M. Gutiérrez Arsaluz, L. A. Villarreal Cárdenas, Andrés Rosas Camacho, A. Cisneros Farías, E. Saldivar Guerra, A. I. de la Peña Mireles, J. R. Infante Martínez, publicación internacional 25/01/2015. Actualmente en explotación por el Grupo ALFA.

Docencia y formación de recursos humanos

Como bien sabemos uno de los objetivos fundamentales de las universidades es la docencia y la formación de recursos humanos. En la División de Ciencias Básicas se ofrecen 10 carreras, entre ellas ingeniería química, ingeniería física e ingeniería ambiental, de las cuales suelen tenerse el mayor número de estudiantes para proyectos terminales (proyectos de fin de carrera para obtener la licenciatura), así como para tesis de maestría y doctorado. En estas licenciaturas antes mencionadas, se imparten materias relacionadas con las bases para entender la catálisis como termodinámica, balance de materia, entre otras.

Asimismo, en el Posgrado en Ciencias e Ingeniería Línea en Materiales y Línea en Ambientales, se ofrece especialización, maestrías y doctorados, consolidados y dentro del Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNCP), por lo cual se otorgan becas a los estudiantes matriculados en dichos posgrados.

En el posgrado se imparten materias a nivel especializado en catálisis como síntesis de materiales, caracterización de materiales y evaluación de materiales, entre otras más. El claustro de profesores-investigadores dirige tesis de los diferentes niveles del posgrado, contribuyendo a la formación de recursos humanos. Este claustro de académicos forma parte de los jurados de tesis, participando en elaboración y modificación de programas de estudio, entre otras actividades.

Principales logros

Los logros alcanzados en la UAM-A son:

- La existencia de grupos de investigación consolidados, relacionados con el estudio de la síntesis, caracterización, evaluación catalítica de los diferentes materiales catalíticos.
La creación de laboratorios aptos para desarrollar investigación en catálisis, además de tener los equipos especializados para la caracterización de los catalizadores.
- La consolidación de colaboraciones (redes), nacionales e internacionales para un intercambio de conocimientos, y formas de trabajo.
- La participación activa de los investigadores en diferentes asociaciones académicas como la Academia de Catálisis, la Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Membranas, Sociedad Química de México, NACS, entre otras.
- La participación en los diferentes foros en catálisis para compartir los resultados de los proyectos y líneas de investigación.
- La formación de recursos humanos es un logro muy importante ya que como se ha mencionado en la sección de docencia, es uno de los objetivos de las instituciones de educación superior.

Cabe mencionar, que la interacción con grupos industriales como ALFA, entre otros, para la aplicación de sistemas catalíticos, como lo son los aluminosilicatos microporosos en la desintegración catalítica de polímeros, como los plásticos, motiva a los académicos a realizar sus investigaciones en dicha área con más interés.

Perspectivas

- Es importante incrementar la síntesis de materiales micro y mesoporosos, su modificación postsíntesis para su aplicación en diferentes tipos de reacciones, ya sea con patrones de reacción ácida, básicas y redox (oxidación).
- Aplicar los diferentes materiales catalíticos en reacciones con Biomasa, ya que cada día se pueden obtener compuestos importantes de desechos como aceites usados (biodiesel), aguas contaminadas con compuestos o fármacos (formaldehído, analgésicos, antiinflamatorios, etc.), con glicerol, el cual se obtiene en grandes cantidades como producto secundario del biodiesel, y de *el-glicerol*-, se obtienen por diferentes tipos de reacción compuestos de alto valor agregado.
- Continuar con las colaboraciones con grupos industriales para la aplicación de los catalizadores que se desarrollan en los diferentes grupos de investigación en esta institución y así elaborar patentes que puedan ser explotadas realmente.
- Incrementar la colaboración y participación de grupos académicos teóricos con grupos experimentales, pues es necesario el conocimiento que aporten los académicos teóricos para profundizar en el mundo de las interacciones compuestos químicos-materiales catalíticos.

Sitios de interés

- Página institucional:
<[http:// www.azc.uam.mx](http://www.azc.uam.mx)>
- Página de DCVI:
<<http://cbi.azc.uam.mx>>
- Página de AQUA:
<<http://quimicaaplicada.azc.uam.mx/>>
- Página de LQM:
<<http://www.azc.uam.mx/cbi/quimica/labmateriales/>>

UAM-Unidad Iztapalapa, División de Ciencias Básicas e Ingeniería

Nancy Martín Guaregua,* José Antonio de los Reyes Heredia**

RESUMEN: En esta contribución se describen las actividades de investigación, relacionadas con nanociencias y nanotecnología, vinculadas con sus aplicaciones en catálisis, que se realizan en la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Se describe brevemente esta división académica, los departamentos que la constituyen y los cuerpos académicos relevantes en el tema. Se describen las líneas de investigación realizadas por estos grupos de académicos así como la infraestructura de investigación. Se abordan los programas docentes de licenciatura y posgrado de la división académica y se particularizan aquellos relacionados con catálisis. Se concluye con las perspectivas de investigación a futuro.

PALABRAS CLAVE: UAM I, ciencias básicas e ingeniería, nanocatálisis.

ABSTRACT: Research activities, related with nanoscience and nanotechnology and their applications to catalysis are described as they are carried out at the División de Ciencias Básicas e Ingeniería from Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. The academic division is described in terms of its departments and research groups. Research programs are given as well as the equipment devoted to these activities. Undergraduate and graduate programs are mentioned for the academic division and a special emphasis is given to those related with catalysis. Finally, future research perspectives are presented.

KEYWORDS: UAM I, basic sciences and engineering, nanocatalysis.

Introducción

La Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) fue creada en 1974 e inició actividades en 3 unidades: Azcapotzalco, Iztapalapa y Xochimilco. A éstas se agregaron después del año 2002, las unidades Cuajimalpa y Lerma. La UAM consideró desde su fundación un modelo departamental, en donde las funciones sustantivas de docencia, investigación y preservación y difusión de la cultura descansan en la figura del profesor-investigador, original en México para la época de sus inicios. La UAM posee una estructura de tipo matricial, en donde pueden concurrir fácilmente diferentes disciplinas en un mismo campus académico. En cada uno de éstos tiene 3 divisiones académicas, las que a su vez abarcan de 3 a 5 departamentos.

Recibido: 28 de febrero de 2017. Aceptado: 21 de marzo de 2017.

* Departamento de Química, UAM-Iztapalapa. Correspondencia: (mgnc@xanum.uam.mx).

** Laboratorio de Nanociencia y Nanotecnología, Grupo Jumex, Km. 12.5 Ant. Carretera México Pachuca, Xalostoc, Ecatepec de Morelos, C.P. 55340, Estado de México, México.
Correspondencia: (jjimenezr@jumex.com.mx).

En particular, la División de Ciencias Básicas e Ingeniería (DCBI) de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa (UAM-I) está ubicada en la zona oriente de la Ciudad de México. La División está integrada por 5 departamentos académicos: Física, Química, Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Ingeniería Eléctrica y Matemáticas. En total, se tienen 28 áreas de investigación y 31 cuerpos académicos. Cuenta con 289 profesores de tiempo completo.

En tres de los cinco departamentos de la DCBI (Física, Ingeniería de Procesos e Hidráulica y Química) se realizan trabajos de investigación básica en temas relacionados con la nanociencia y la nanotecnología (NyN). De manera particular se describen las líneas relacionadas con catálisis, que se desarrollan en dos de estos departamentos.

En el Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, la investigación se articula en dos cuerpos académicos, dentro del Área de Ingeniería Química: Diseño de materiales catalíticos avanzados y Procesos de separación-reacción aplicados a sistemas químicos y biológicos. En el Departamento de Química, las actividades equivalentes se llevan a cabo en dos cuerpos académicos, dentro del Área de Catálisis: Catálisis heterogénea y Ecocatálisis.

Los cuerpos académicos se integran generalmente por profesores investigadores adscritos a los departamentos mencionados.

- **a. Catálisis heterogénea:**
Dr. José Gilberto Córdoba Herrera, M. en C. Jesús Alejandro López Gaona, Dra. Nancy C. Martín Guaregua y Dra. Margarita Viniegra Ramírez.
- **b. Diseño de materiales catalíticos avanzados:**
Dr. José Luis Contreras Larios (UAM-Azcapotzalco), Dr. Gustavo A. Fuentes Zurita, Dr. Sergio A. Gómez Torres.
- **c. Ecocatálisis:**
Dr. Maximiliano Joel Asomoza Palacios, Dra. Virineya Sonia Bertín Mardel, Dra. Gloria Alicia del Angel Montes, Dr. José Ricardo Gómez Romero, Dr. Francisco Javier Tzompantzi Morales.
- **d. Procesos de separación-reacción aplicados a sistemas químicos y biológicos:**
Dr. José Antonio de los Reyes Heredia, Dr. Tomás Viveros García.

Líneas de investigación

Las líneas de investigación relacionadas con la NyN en catálisis que se estudian en la DCBI de la UAM-I son las siguientes:

- **a. Catálisis heterogénea**
“Reacciones catalíticas de hidrogenación y oxidación en metales de transición”. Ésta tiene como objetivo central estudiar las propieda-

des fisicoquímicas de catalizadores a base de óxidos mixtos y de sulfuros de metales de transición, para reacciones de reformación y oxidación de hidrocarburos, y correlacionarlas con la desactivación de depósitos de residuos carbonáceos.

“Transformación de glicerol en materiales de alto valor”. Se trabaja con materiales a base de óxidos metálicos soportados para la obtención de acroleína y otros compuestos de alto valor agregado.

- **b. Diseño de materiales catalíticos avanzados**

“Catálisis ambiental”. Se trabaja en el desarrollo de materiales catalíticos destinados a la reducción de NO_x , oxidación de VOCs y en general a la eliminación de contaminantes provenientes de procesos de combustión o de procesos industriales.

“Catálisis con nanomateriales”. Se trabaja en el diseño de estructuras a escala nanométrica, ya sea como metales o como óxidos, para su utilización en reacciones a baja temperatura y para lograr control de selectividad en reacciones competitivas.

“Catalizadores de sitio sencillo”. El objetivo es lograr regular la selectividad en reacciones de interés farmacológico mediante el diseño de estructuras bien definidas en los ligandos de metales de transición heterogeneizados en soportes mesoporosos.

“Espectroscopía y modelado molecular de estructuras catalíticas”. Se estudia la relación estructura-propiedades catalíticas mediante simulación con métodos como funcionales de la densidad y PM3. Esto se relaciona directamente con nuestros estudios experimentales en reacciones como oxidación selectiva de CO, reducción selectiva de NO, hidrogenación selectiva de compuestos proquirales, entre otras.

- **c. Ecocatálisis**

“Oxidación catalítica. Descontaminación catalítica de compuestos orgánicos en efluentes acuosos”. Se encuentra orientada al conocimiento de los procesos de oxidación de compuestos orgánicos en medios acuosos empleando catalizadores metálicos y bimetálicos soportados con óxidos refractarios como alúmina, óxido de zirconio, sílice, óxido de cerio, etc. Fisicoquímica, catálisis, oxidación hasta mineralización, cinética química en soluciones.

“Combustión catalítica. Descontaminación catalítica de compuestos orgánicos volátiles”. Se refiere a la combustión total de compuestos orgánicos volátiles que no formen productos de combustión de alta toxicidad. Catálisis heterogénea, fisicoquímica cinética química.

“Convertidor catalítico. Descomposición de NO_x , CO e hidrocarburos en emisiones de automotores”. Estudia la reducción de NO_x empleando como reductores los hidrocarburos y/o monóxido de carbono.

no que forman parte de la mezcla de emisiones de los automotores. Fisicoquímica, catálisis heterogénea, compuestos cerámicos de óxidos mixtos (materiales).

“Fotocatálisis. mineralización de compuestos orgánicos e inorgánicos en fase gas y medio acuoso”. Está relacionada con la fotodegradación empleando como fuente de energía luz solar y como fotocatalizadores óxido de titanio, óxido de circonio y óxidos mixtos. Fotoquímica, catálisis heterogénea, cinética química, semiconductores (materiales).

“Formulación de gasolinas ecológicas. Mediante procesos catalíticos (DIPE, dimerización de olefinas).” Línea dedicada al estudio de la síntesis de fracciones de hidrocarburos con menor impacto ambiental. Catálisis heterogénea, formulación de gasolinas, síntesis de compuestos orgánicos oxigenados como aditivos para gasolinas.

“Catálisis teórica. Mecanismos de reacción de descomposición de NO_x y CO e hidrocarburos”. Lleva a cabo un estudio sobre los modelos para la descomposición de los contaminantes más importantes que se encuentran en la atmósfera. Química teórica, fisicoquímica y contaminación atmosférica.

- **d. Procesos de separación-reacción aplicados a sistemas químicos y biológicos**

“Desarrollo de nanomateriales”. Esta línea tiene como finalidad el desarrollo de nuevos materiales con diferentes aplicaciones, aunque con énfasis primordial en catalizadores y soportes catalíticos, y el estudio de diferentes reacciones de interés industrial, ambiental y de rediseño de procesos. Entre las motivaciones para este trabajo se encuentran la legislación ambiental más estricta, el desarrollo de la química fina (o de especialidades), el diseño de procesos limpios y la recuperación de subproductos valiosos en procesos existentes. La síntesis de nuevos materiales se efectúa bajo la premisa de poder controlar y modular las diferentes propiedades (texturales, estructurales, ácido-base) deseables en los procesos de aplicación, para lo cual se emplean diferentes técnicas experimentales tradicionales y de punta (precipitación, sol-gel, coloidales), y establecer la correspondencia entre las propiedades resultantes y los diferentes métodos de síntesis. La caracterización de los materiales se realiza empleando técnicas experimentales que nos permiten obtener propiedades microscópicas (estructura molecular) y macroscópicas (propiedades texturales y superficiales). Las aplicaciones de estos materiales tienen relevancia en la protección del medio ambiente así como en el diseño y rediseño de procesos.

Infraestructura

La DCBI de la UAM-I cuenta con laboratorios de investigación, divisional y departamental. Estos laboratorios están ubicados en varios edificios del campus universitario (Edifs.: W, R, T, PPU). A continuación, se mencionan los laboratorios divisionales de investigación, en conjunto con los equipos con los que cuentan:

Laboratorio de Espectrometría de masas (en colaboración con la División de Ciencias Biológicas y de la Salud).

- Laboratorios de Resonancia Magnética Nuclear, con resonancia magnética nuclear para líquidos y resonancia magnética nuclear para sólidos.

- Laboratorio de Nanociencia, con microscopía de fuerza atómica (AFM y STM).

- Laboratorio de Microscopía Electrónica, con microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM) y barrido (SEM).

- Laboratorios de Difracción de Rayos X, con equipos de difracción de rayos X (DRX) y dispersión de rayos X a bajo ángulo (SAXS).

- Laboratorio de Supercómputo y Visualización en Paralelo, que forma parte del Proyecto Nacional “Delta Metropolitana de Cómputo de alto Rendimiento” (UAM-UNAM-CINVESTAV).



FIGURA 1. Equipo de resonancia magnética de sólidos Bruker Avance 300 MHz.

FIGURA 2. Equipo de caracterización de sólidos mediante métodos de tratamientos térmicos programados (TPR/TPD/TPO) Modelo AMI 90 Altamira.



Los laboratorios departamentales cuentan con una gran variedad de equipos dedicados a la síntesis, caracterización y evaluación de nanomateriales. Entre ellos, se pueden nombrar a los siguientes: cromatógrafos de gases con detectores de ionización de flama y de conductividad térmica, cromatógrafos HPLC, espectrofotómetros FTIR (infrarrojo medio) y UV-visible, espectrofotómetro de fluorescencia, sistemas catalíticos para reacción en fase gas; reactores Parr; unidades TPR-TPD.

Docencia

La DCBI cuenta con diez programas de licenciaturas, en ciencias básicas e ingenierías: computación, física, química, matemáticas, ciencias atmosféricas, ingeniería biomédica, ingeniería en energía, ingeniería electrónica, ingeniería química e ingeniería hidrológica, la mayoría de ellas certificadas. En algunas de estas licenciaturas se imparten unidades de enseñanza y aprendizaje (UEA) básicas u optativas que forman parte del plan de estudios y cubren temas relacionados con NyN en los diferentes niveles de formación. En particular, en la licenciatura en química existe una opción para titulación en el área de concentración llamada ciencia de los nanomateriales.

Por su parte, a nivel posgrado (maestrías y doctorados) se ofrecen doce programas organizados en un sistema divisional, con proyectos de investigación relacionados con NyN. La mayoría de los posgrados de la DCBI tienen el reconocimiento por parte del Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del CONACyT. Los académicos dirigen proyectos terminales en la licenciatura y tesis de maestría y doctorado, en el posgrado relacionados con estos temas. En particular, los posgrados en ingeniería química y química constituyen los espacios en donde se forman maestros y doctores en ciencias, con temas de tesis orientados a catálisis.

Participación en redes y colaboraciones

Los miembros de la DCBI se han integrado junto con la comunidad científica nacional a las redes temáticas del CONACyT (Red Temática de Nanociencia) y PRODEP a través de los diferentes cuerpos académicos: Nanotecnología y Calidad Ambiental (UAM-A); Red Nacional de Investigaciones en Química Analítica y Electroquímica (UAM-A). Asimismo, son miembros activos en las sociedades científicas que tienen relación con la catálisis en México: Academia de Catálisis, Sociedad Química de México, Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química, o, a nivel internacional: North American Catalysis Society, y, Federación Iberoamericana de Sociedades de Catálisis.

Además de las colaboraciones entre los cuerpos académicos conformados en la DCBI, se han establecido colaboraciones con instituciones nacionales e internacionales.

Nacionales

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
Centro de Investigación y Estudios Avanzados, IPN.
Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM.
Centro de Nanociencias y Nanotecnología, UNAM.
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, IPN.
Centro Universitario de La Ciénaga, U. de G. Ocotlán.
Instituto de Física, UNAM.
Instituto de Investigación en Materiales, UNAM.
Instituto Mexicano del Petróleo.
Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
Universidad Autónoma de Nuevo León.
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
Universidad de Guadalajara, Campus Los Altos de Jalisco.

Internacionales

Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, CSIC, Madrid, España.
Universidad de Santander, Santander, Colombia.
Instituto de Investigación sobre Catálisis y el Medio Ambiente-CNRS,
Lyon, Francia.
Universidad de California, Berkeley, EUA.
Universidad Técnica de Múnich, Alemania.

Principales logros

Los logros obtenidos por nuestros académicos en el área de NyN son muy amplios. Se tiene un gran número de publicaciones de artículos científicos en revistas de alto prestigio internacional, con un promedio de más de 3 artículos por año por investigador; la formación de recursos humanos en los niveles de licenciatura y posgrado, con 3 doctores y 3 maestros formados por año; así como también un buen número de artículos de divulgación científica. En la División de CBI, trabajando en catálisis, el Sistema Nacional de Investigadores ha reconocido a 1 investigador emérito, 4 en el nivel III, 3 en el nivel II y 3 en el nivel I. Las patentes históricamente registradas por los investigadores de la División rebasan la decena.

Perspectivas sobre la investigación en NyN

Las investigaciones en nanociencias y nanotecnología aplicadas a catálisis son muy amplias, dadas las aplicaciones diversas. En particular, las líneas de investigación en la División de Ciencias Básicas e Ingeniería se centran en trabajo disciplinario de alta calidad y un componente inter y multidisciplina-

rio para resolver problemas y aportar nuevos conocimientos. En particular, las líneas de investigación convergen en tres vertientes:

- Solución a problemas para mejorar el medio ambiente, mediante procesos sustentables, que consideren el desarrollo de materiales más activos y selectivos, con un menor consumo de energía o que contribuyan a eliminar la contaminación ambiental de aire, agua y suelo.
- Desarrollo de materiales con aplicaciones en química fina, industria farmacéutica o industrias para la producción de satisfactores con alto valor agregado o bien, como sustitutos de productos actuales, como combustibles alternos o productos petroquímicos y químicos, a partir de fuentes alternativas (biomasa de diversos tipos).
- Generación de nuevos conocimientos que permitan profundizar el entendimiento de procesos catalíticos existentes y los materiales usados en las reacciones, para el desarrollo de nanomateriales con características mejoradas.

Sitios de interés

- Página institucional:
<www.izt.uam.mx>
- División de Ciencias Básicas e Ingeniería
<<http://www.cbiuami.org/>>

Grupo de investigación en Química de Materiales, Departamento de Ciencias Básicas, División de CBI, Universidad Autónoma Metropolitana

Ana Marisela Maubert Franco,* Elizabeth Rojas García,
Ricardo López Medina

RESUMEN: Se hace una breve presentación de la fundación de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) en 1974, su organización académica departamental, la organización de la investigación por áreas y la creación de la figura de profesor-investigador. Además, se describen las actividades de investigación, docencia y difusión de la cultura del grupo de investigación adscrito al Área de Química de Materiales del Departamento de Ciencias Básicas, División de CBI de la UAM-A, el cual realiza sus actividades de investigación en catálisis desde hace varios años y en la nanociencia y la nanotecnología en el último lustro. Asimismo, se mencionan los proyectos que se llevan a cabo en el área, la infraestructura y sus laboratorios, las colaboraciones y el desempeño académico de los investigadores en el ámbito de la docencia y la formación de recursos humanos en las licenciaturas de ingeniería química e ingeniería ambiental; así como en el Posgrado de Ciencias e Ingeniería de Materiales, maestría y doctorado (perteneciente al Programa Nacional de Posgrados de Calidad del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología PNPC-CONACYT). Se mencionan, además, los logros alcanzados y perspectivas a futuro.

PALABRAS CLAVE: UAM, Unidad Azcapotzalco, catálisis, fotocatalisis, zeolitas, materiales mesoporosos, MOFs, nanomateriales, nanotubos de carbono, grafeno.

ABSTRACT: This article makes a brief presentation of the founding of the Metropolitan Autonomous University (UAM), its departmental academic organization, the organization of research by areas and the creation of the professor-researcher figure. In addition, the activities of research, teaching and the culture diffusion of the research group attached to the Materials Chemistry Area of the Department of Basic Sciences, CBI Division of UAM-A, are described. This group has carried out its research activities in catalysis for several years and in nanoscience and technology in the last five years. Also mentioned are the projects that are carried out in the area, the infrastructure and its laboratories, the collaborations and the academic performance of the researchers in the field of teaching and the human resources training in the bachelors of chemical and environmental engineering; as well as in the Postgraduate of Sciences and Engineering of Materials, Masters and Doctors degree (belonging to the National Postgraduate Program of Quality of the National Council of Science and Technology. Spanish acronym: PNPC-CONACYT). Achievements and future prospects are also mentioned.

KEYWORDS: UAM, Azcapotzalco Unit, materials, catalysis, photocatalysis, zeolites, mesoporous materials, MOFs, nanomaterials, carbon nanotubes, graphene.

Recibido: 23 de enero de 2017. Aceptado: 7 de marzo de 2017.

* Área de Química de Materiales, Departamento de Ciencias Básicas, CBI, UAM-A. Av. San Pablo 180, Col. Reynosa-Tamaulipas, C.P. 022000, Delegación Azcapotzalco, Cd. Mx., México. Correspondencia: (amf@correo.azc.uam.mx).

Introducción

La Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) fue creada por decreto presidencial el 1 de enero de 1974, en respuesta a la solicitud de la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES) que demandaba la necesidad de establecer una nueva universidad en el área metropolitana de la Ciudad de México, en razón del incremento de la demanda estudiantil y la creciente insuficiencia de las instituciones universitarias existentes para admitir a más alumnos. La UAM se fundó en 1974 y en la actualidad cuenta con una Rectoría General y cinco Unidades con su organigrama propio: Azcapotzalco, Iztapalapa, Xochimilco, Cuajimalpa y Lerma. Las tres primeras datan de 1974, las dos últimas de 2005 y 2009, respectivamente. En el inicio se decidió ubicar la investigación científica en la Unidad Iztapalapa; las carreras profesionalmente hablando o tradicionales, como las ingenierías y la arquitectura en la Unidad Azcapotzalco y las relacionadas con las ciencias de la salud en la Unidad Xochimilco. La ubicación estratégica de las unidades universitarias cumplió con el objetivo de favorecer la descentralización permitiendo el pleno desarrollo de cada una de ellas. Actualmente, la Universidad Autónoma Metropolitana cuenta con 77 licenciaturas, 12 especializaciones, 56 maestrías y 37 doctorados, que se imparten en sus cinco unidades.

La institución es una de las universidades con mayor reconocimiento académico en México. En 2016, es la segunda mejor universidad de dependencia pública y tercera incluyendo las privadas; es la segunda en México en tener un mayor número de profesores-investigadores de tiempo completo con doctorado, de acuerdo con el Estudio Comparativo de Universidades Mexicanas (ECUM); la segunda en tener mayor número de investigadores incorporados en el Sistema Nacional de Investigadores (SNI) y la segunda en tener a investigadores en el nivel III del mismo. Una de las principales universidades en México en aportar el mayor número de investigaciones. Así como ser la segunda institución en tener publicaciones en revistas arbitradas, como en el ISI, Latindex y en revistas incluidas en el *Índice de revistas mexicanas de investigación científica y tecnológica* del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), también se encuentra entre las primeras cuatro con el mayor número de patentes otorgadas en México. <https://es.wikipedia.org/wiki/Universidad_Aut%C3%B3noma_Metropolitana>. La UAM cuenta con más de 3 mil profesores-investigadores y aproximadamente 53 mil alumnos.

La UAM se encuentra organizada de acuerdo con su estructura orgánica, en un modelo de órganos colegiados, unidades académicas, divisiones y departamentos, estos últimos incluyen las áreas de investigación en donde se encuentra fundamentalmente la organización de la actividad de investigación.

El grupo de investigación al que se hace referencia se encuentra asentado en el Área de Química de Materiales, una de las nueve áreas de investigación del Departamento de Ciencias Básicas (DCB) de la División de Cien-

cias Básicas e Ingeniería (DCBI) de la Unidad Azcapotzalco. Estas áreas que conforman el Departamento de CB desarrollan actividades en las disciplinas de física, matemáticas y química.

El grupo de investigación forma parte del proyecto aprobado por el Consejo Divisional desde hace más de diez años, cuyo título es: “síntesis, modificación y aplicación de materiales sólidos porosos a fenómenos de sorción y catálisis”, el cual se encuentra adscrito a la línea de investigación divisional: Desarrollo y caracterización de materiales, y al programa de investigación del área: Estudios teóricos y experimentales de mecanismos de reacción y fenómenos superficiales de materiales y su aplicación como adsorbentes y catalizadores en procesos de separación, purificación y de obtención de productos de alto valor agregado.

El objetivo general del proyecto es el de contribuir al desarrollo de materiales porosos naturales y sintéticos que permitan la captura y almacenamiento de H_2 , CO_2 y su transformación en productos de elevado valor agregado y la eliminación de colorantes tóxicos por medio de fotocatalisis.

Dentro de los objetivos particulares se encuentra la síntesis de materiales de estructura metal-orgánica (MOFs, por sus siglas en inglés), nanotubos de carbono de pared simple y múltiple, materiales mesoporosos MCM-41 y SBA-15, hidróxidos dobles laminares o tipo hidrotalcita y zeolitas sintéticas (mordenita, chabazita, etc.); así como la utilización de zeolitas naturales (mordenita, chabazita, etc.) modificadas y funcionalizadas; la caracterización de los materiales estudiados y su evaluación en los diferentes temas del proyecto.

Como antecedente del presente proyecto, éste se enfocó principalmente en el estudio y desarrollo de adsorbentes a base de zeolitas naturales, de abundante presencia en la república mexicana. Se caracterizaron algunos materiales provenientes de yacimientos de Sonora, Tamaulipas, San Luis Potosí y Oaxaca principalmente; del mismo modo, se modificaron para mejorar sus propiedades por medio de intercambio catiónico, éstos se emplearon en la captura de ion amonio, de metales pesados: cromo, arsénico, manganeso, entre otros.

Hoy por hoy, el proyecto desarrolla varios temas indicados a continuación, siendo los dos primeros los que se encuentran dentro del rango de la nanotecnología:

Captura y almacenamiento de H_2

En las últimas décadas se ha impulsado la investigación sobre el hidrógeno al considerarlo uno de los combustibles más viables y limpios para sustituir a los combustibles convencionales, dado que el producto primario de la combustión es el vapor de agua. Aunque hay un avance acelerado en los métodos de obtención de hidrógeno, el almacenamiento de este recurso sigue siendo un problema para su utilización. Se ha observado en la literatura que el alma-

cenamiento de hidrógeno en materiales sólidos (adsorbentes) es la manera más segura y compacta, ya que es posible capturar una mayor cantidad de hidrógeno en un menor volumen. Otra ventaja importante es el requerimiento de menor cantidad de energía en su almacenamiento, pues estos materiales sólidos se pueden utilizar a presiones y temperaturas ambientales. La capacidad de adsorción-desorción es una ventaja más, ya que es posible controlarla variando la temperatura del adsorbente. Entre los materiales (adsorbentes) con capacidad de almacenar hidrógeno se encuentran: nanotubos de carbono, zeolitas, estructuras metal-orgánicas, grafeno, hidruros de metales convencionales, hidruros metálicos complejos y boranos, etc. El grupo se encuentra realizando investigación con nanotubos de carbono y estructuras metal-orgánicas (MOFs) los cuales están siendo de gran interés debido a que ambos sistemas han demostrado tener capacidades de adsorción para este gas, la cual se ha mostrado superior al 2% en peso a 77 K y baja presión, con áreas específicas mayores a 7000 m²/g, para el caso de las MOFs.

Transformación de CO₂ en productos de valor agregado

Siguiendo los principios básicos de la sostenibilidad, que son: reducir, reciclar y reutilizar, son cada vez más los grupos de investigación en todo el mundo los que plantean la posibilidad de reutilizar el CO₂, transformándolo en productos de alto valor agregado, como una alternativa diferente a su captura. Hay varias posibilidades interesantes para la conversión del CO₂ en el área de la fotocatalisis y la electrocatalisis, pero éstas han recibido poca atención aplicadas a la catálisis medioambiental. Aunado a lo anterior, es importante recordar la aseveración de Styring en la conferencia que presentó (Faraday discussion 155 On artificial photosynthesis, en el 2011), “el mundo requiere nuevos combustibles, ambientalmente amigables, además de regenerables para sustituirlos por los combustibles fósiles. El combustible debe ser producido a partir de fuentes baratas, renovables y que estén disponibles en cualquier lugar. La nueva área de investigación de combustibles solares, apunta a satisfacer esta demanda”. Por lo que, considerando la conversión de CO₂ un problema catalítico fundamental, el grupo de investigación ha incurrido en la temática utilizando zeolitas naturales (mordenita, chabazita, etc.) como soportes catalíticos de semiconductores como el óxido de titanio con resultados prometedores.

Degradación fotocatalítica de colorantes orgánicos

Hay un gran número de diferentes tipos de contaminantes orgánicos como son: colorantes, fenoles, aceites, grasas, pesticidas, detergentes, productos farmacéuticos, por mencionar algunos, siendo los colorantes los más significativos, dado que del total de los contaminantes de las aguas residuales representan del 17 al 80 %. Éstas son moléculas muy complejas y químicamente

muy estables, no degradables en agua, las cuales causan una severa contaminación. Uno de los retos de importancia es disminuir este problema. En las últimas décadas, se han reportado varios métodos de eliminación de colorantes; sin embargo, no han sido del todo efectivas. Por lo que hay una necesidad enorme de encontrar tratamientos alternativos que sean eficaces y rentables para la eliminación de los colorantes. Una alternativa ha sido utilizar la fotocatalisis usando catalizadores semiconductores logrando oxidar las moléculas orgánicas en productos menos tóxicos o llevar a cabo la mineralización completa de los mismos (H_2O y CO_2). Hasta la fecha, el TiO_2 ha sido el fotocatalizador de mayor éxito debido a su alta eficiencia, bajo costo y disponibilidad. Las últimas investigaciones sobre nuevos materiales fotocatalíticos, ya sean semiconductores o no, han emitido una serie de posibles sustitutos, en especial en el caso de las aplicaciones que hacen uso de la luz solar.

Los MOFs recientemente, se han examinado como fotocatalizadores para conducir un número de transformaciones orgánicas motivadas en gran parte por una demanda de solucionar los problemas de contaminación, en vista de sus aplicaciones potenciales en la degradación de contaminantes orgánicos. Está claro que los denominados MOFs proporcionan una oportunidad única para explorar nuevos catalizadores y lograr un buen rendimiento frente a la degradación de contaminantes orgánicos. Los MOFs con propiedades fotosensibles pueden tener un papel activo, pues los ligandos orgánicos pueden absorber fotones y transferir electrones por parte del ligando al centro metálico resultando en un estado excitado fotogenerado. En la síntesis de los MOFs, los ligandos más comunes son los policarboxilatos aromáticos, después de absorber fotones pueden transferir éstos a los cationes de metal unidos a ellos debido a su exceso de electrones. Además, el ligando orgánico tiene bandas de absorción intensas centradas en una longitud de onda de 250 nm y, dependiendo de los sustituyentes, ésta se puede desplazar hasta los 300 nm, e inclusive hasta la región en el visible, por lo cual el uso de materiales MOFs como fotocatalizadores es un campo muy amplio y emergente que el grupo de investigación está incursionando.

Nanotubos de carbono y grafeno como sustratos en la generación de hidrógeno

En nuestro grupo también se está realizando investigación en el uso de los nanomateriales como los nanotubos de carbono y grafeno siendo éstos de gran interés dado que presentan excelentes propiedades como alta conductividad eléctrica, y una gran capacidad de almacenamiento de carga, lo que sugiere que los electrones fotogenerados en el fotocatalizador (TiO_2 o MOFs) se pueden transferir a los nanotubos de carbono, que tienen un nivel de fermi menor, lo cual favorece la separación de cargas. Los nanotubos de carbono al igual que el grafeno podrían modificar la banda prohibida o actuar como fotosensibilizadores, por lo que podrían absorber fotones del visible y

transferir electrones al semiconductor. Estos nanomateriales aplicados a la fotocatalisis están siendo muy estudiados, ya que pueden aumentar la eficiencia de fotocatalizadores como el óxido de titanio (TiO_2) modificando así sus propiedades estructurales, químicas, térmicas y eléctricas. En cuanto a las propiedades estructurales, su extensa área específica ($200\text{--}400\text{ m}^2/\text{g}$) incrementa el área de un material compuesto basado en nanotubos de carbono/semiconductor, incrementando así el número de sitios activos.

Colaboraciones y proyectos

- Convocatoria Conjunta de Movilidad, 2016, México-Francia. Proyecto: *Determinación de los sitios óptimos en la adsorción de hidrógeno en la MOF HKUST-1 mediante cálculos teóricos*, estancia de un alumno. Universidad Pierre et Marie Curie Sorbona, París VI.
- Apoyo al Fortalecimiento y Desarrollo de la Infraestructura Científica y Tecnológica del CONACYT. Proyecto: *Fortalecimiento del Área de Química de Materiales en la síntesis y caracterización de nanotubos de carbono (NTCs) sintetizados a partir de materiales híbridos metal-orgánicos (MOFs)*. 2015.
- Apoyo al Fortalecimiento y Desarrollo de la Infraestructura Científica y Tecnológica del CONACYT. Proyecto: *Estudio de la relación estructura-actividad en catalizadores nanoestructurados empleados en la generación de hidrógeno y degradación de contaminantes monitoreado con espectrofotómetros Raman y UV-vis in situ y operando*. 2015.
- Captura y confinamiento de CO_2 y estudio de su transformación sustentable en productos con valor agregado. CONACYT-SENER/IIM-UNAM/UAM-A. Fondo: S0019; Proyecto 150358. 2011-2013.
- Formación de nanotubos de carbono a partir de sitios activos, situados en las cavidades de sólidos mesoporosos MCM-41. Proyecto de cooperación científica y tecnológica internacional bilateral. Programa: Convenio Bilateral México-Francia J110. 524/2006 CONACYT-CNRS (2006-2008). Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement (IRSCE/CNRS), Lyon, Francia.
- Proyecto FIES-98-37-III. Desarrollo de nuevos materiales a base de membranas catalíticas para su aplicación en reacciones de refinación del petróleo: alquilación de isoparafinas para la obtención de gasolinas de alto octano. Convenio UAM-A/Instituto Mexicano del Petróleo 1998-2001.
- Estudio por microscopía electrónica de barrido y microsonda de energía dispersa a partículas suspendidas PST y PM10, contenidas en los filtros de la red automatizada de monitoreo atmosférico (Raman) de la ZMVM. UAM-A – Dirección de Prevención y Control del Medio Ambiente, Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. 1998-2000.

- Proyecto de Excelencia: “Evaluación de zeolitas naturales como adsorbentes”, UAM-I, UAM-A y CONACyT. 1994.
- Fondo para el fortalecimiento de la Infraestructura CONACyT, F-645, para el fortalecimiento y creación de una nueva infraestructura para el Departamento de Ciencias Básicas. UAM-A y CONACyT. 1995.
- Proyecto Fondo para el fortalecimiento de la Infraestructura CONACyT, F-236-E, para el desarrollo del Laboratorio de Catálisis y Adsorción, UAM-A y CONACyT. 1993.
- Se participó en las siguientes redes y proyectos coordinados por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, CyTED:
 - a) Red Temática V.C.: “Catalizadores para la protección ambiental”. Subprograma V: “Catalizadores y adsorbentes para el medio ambiente y calidad de vida”. 2001-2003.
 - b) Proyecto V.6: Desarrollo de adsorbentes para la remoción de metales pesados en efluentes industriales. Subprograma V: “Catalizadores y adsorbentes para la protección del medio ambiente. 1998-2004.
 - c) Red Temática Tamices Moleculares. Subprograma V: “Catálisis y adsorbentes”. 1991-1993.

Infraestructura disponible

El grupo de investigación del Área de Química de Materiales cuenta con laboratorios de investigación ubicados en el edificio G y G-bis de la Unidad Azcapotzalco:

– Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, laboratorio de DRX, laboratorio de caracterización (espectroscopías), laboratorio de caracterización de texturas y un laboratorio de preparación de muestras y síntesis de materiales.

La infraestructura disponible del grupo de investigación del Área de Química de Materiales se indica a continuación:

– Equipo de espectroscopía Raman *in via*, Renishaw, el cual está compuesto de tres láseres (488, 532 y 765 nm) y una celda Linkam en la cual se pueden realizar estudios a diferentes temperaturas y con un flujo continuo de gases (N_2 , H_2 , CO_2 , aire, etc.) (figura 1). Equipo de espectroscopía Raman para líquidos portátil 100, Renishaw (figura 2). Equipo de espectroscopía UV-vis con celda de flujo y accesorio de reflectancia

FIGURA 1. Espectroscopía Raman *in via*, Renishaw.



difusa, Agilent Technologies, Cary 1G (figura 3). Micro cromatógrafo de gases, Varian (figura 4). Equipo de texturas Tristar, Micromeritics (figura 5). Difractómetro de rayos-X X'Pert Philips. Microscopio electrónico de barrido MEB, LEO 440 con detector EDS acoplado y su equipo de recubrimiento para muestras. Medidor de texturas: sistema de medición de adsorción volumétrica automático, medición de isothermas completas de adsorción y desorción de gases; caracteriza a detalle micro, meso y macroporos; superficie específica por BET y otros. Belsorp Max de Bel Japan. Analizador automático de adsorción física y química con TPD/TPR/TPO (reducción/oxidación/desorción a temperatura programada). BELCAT-B de Bel Japan. Espectrofotómetro infrarrojo con transformada de Fourier FTIR, Nicolet. Cromatógrafo de gases con detector FID. Marca HP Modelo 6890.

FIGURA 2. Equipo de espectroscopía Raman para líquidos portátil 100, Renishaw.



FIGURA 3. Equipo de espectroscopía UV-vis.

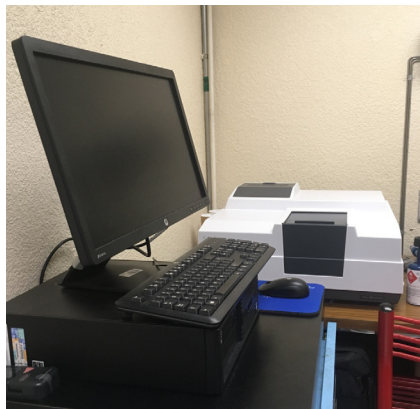
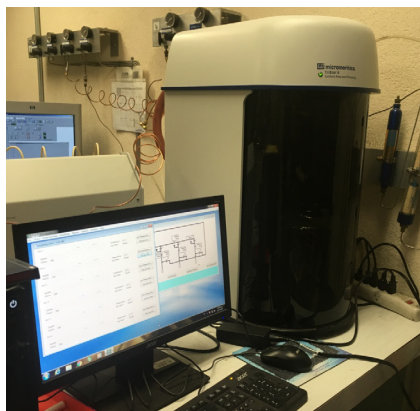


FIGURA 4. Micro cromatógrafo de gases.



FIGURA 5. Equipo de texturas Tristar, Micromeritics.



Además, se tienen algunos equipos menores como son: sistema de reacción para el crecimiento de nanotubos de carbono (figura 6); reactor PARR (300 mL); horno de convección mecánica c/control programable 2 rampas, 10 a 250 °C, Thermolyne; mufla con control programable de temperatura y velocidad de calentamiento, Ney. modelo 1350; Rotavapor Buchi; baño de recirculación Thermolyne; bomba peristáltica; agitador ultrasónico Branson B 1200 R-1; dos controladores máxicos de flujo, 4 canales, 4 transductores, manejo de aire, H₂, N₂, O₂ y/o hidrocarburos gaseosos; dos balanzas analíticas; horno tubular para sistema de reacción y un sistema generador de agua desionizada Millipore.

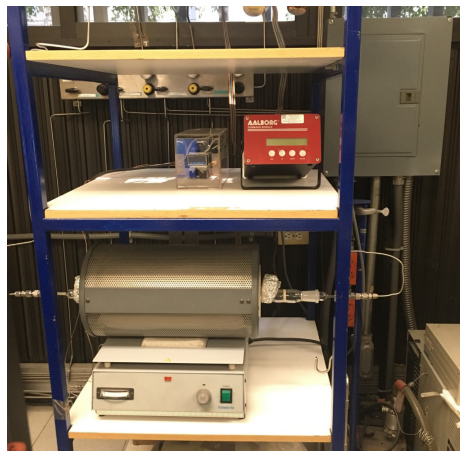


FIGURA 6. Sistema de reacción para el crecimiento de nanotubos de carbono.

Docencia y formación de recursos humanos

Siendo la Universidad Autónoma Metropolitana la universidad que estableció el modelo de profesor-investigador, todos los académicos de la institución deben de cumplir con al menos dos de las tres funciones señaladas en el Reglamento Orgánico de la Universidad: docencia, investigación y difusión de la cultura. Así, los miembros del grupo de investigación participan en los programas de estudio de licenciatura, maestría y doctorado de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Por lo que impartimos los cursos de estructura atómica y enlace químico y estructura y propiedades de los materiales en ingeniería y sus respectivos laboratorios en el tronco general, que involucra alumnos de las diez carreras de ingeniería (ambiental, civil, computación, eléctrica, electrónica, física, industrial, mecánica metalurgia, y química); asimismo se imparten cursos en el tronco profesional de las carreras de ingeniería química (química orgánica, química inorgánica I y II y sus respectivos laboratorios; caracterización de materiales catalíticos en ingeniería, etc.), así como las unidades de enseñanza aprendizaje que contemplan la dirección de proyectos de investigación: Proyecto de Integración en Ingeniería Química I y II e Introducción al Trabajo de Investigación en Ingeniería Química, entre otras. Con respecto a la maestría se imparten los cursos de química de materiales, caracterización de materiales, estado sólido, evaluación de materiales, seminario de química de materiales, así como las unidades de enseñanza aprendizaje que contemplan la dirección de tesis y seminarios: Proyecto de Investigación I, II y III; Seminario de Investigación I, II y III.

La formación de recursos humanos en el área de catálisis contempla 42 Proyectos de Integración (equivalente al trabajo de tesis para egresar de la licenciatura en ingeniería química) dos en curso; 10 de maestría y cuatro en

curso y dos de doctorado. Las tesis de maestría en curso están inmersas en la temática de la nanotecnología.

Principales logros

Uno de los logros fundamentales del grupo fue la fundación del Posgrado en Ciencias e Ingeniería (1998) con dos líneas: la de ciencias e ingeniería de los materiales y la de ciencias e ingeniería ambientales, ambos con maestría y doctorado, el cual ha permanecido en el Padrón Nacional del Posgrado desde hace aproximadamente doce años. Otro logro reciente ha sido la aprobación de dos proyectos en la convocaria “Apoyo al Fortalecimiento y Desarrollo de la Infraestructura Científica y Tecnológica” del CONACYT por \$5,000,000 pesos cada uno. Lo anterior permitió al grupo continuar con la adquisición de equipo fundamental para la caracterización de materiales como son los de espectroscopía Raman *in Via* y Raman para líquidos, espectroscopía UV-vis con reflectancia difusa, el equipo de texturas Tristar y el micro-cromatógrafo de gases, entre otros.

Asimismo, consideramos que se ha formado un grupo de investigación sólido con diferente formación académica, que ha logrado enfocarse en la catálisis y que en los últimos años ha empezado a incursionar en la nanotecnología enfocada a resolver la problemática ambiental.

Áreas de oportunidad y perspectivas

Consideramos que se tiene un grado de avance importante en el estudio de la síntesis de diversas estructuras metal-orgánicas (MOFs), éstas tienen a futuro buenas perspectivas para la degradación de colorantes y en particular han dado excelentes resultados en la captura de hidrógeno, por lo que se considera continuar la investigación en vías de mejorar sus propiedades fisicoquímicas buscando la inclusión de nanotubos de carbono.

En referencia al tema de la transformación del bióxido de carbono en productos de elevado valor agregado como son los combustibles, se continuará utilizando tanto las zeolitas sintéticas como las naturales, buscando la mejor dispersión de semiconductores como el TiO_2 entre otros, al interior de los canales de las zeolitas, se investiga la formación de nanopartículas al interior de los materiales mencionados.

En cuanto a la síntesis de nanotubos de carbono tanto de pared simple como de pared múltiple, si bien se ha logrado obtenerlos, consideramos a futuro emprender un estudio sistemático de los diferentes parámetros que intervienen en su formación como son: los metales empleados, los soportes catalíticos de dichos metales, flujos de gases, temperaturas, tiempos de reacción, obtención del mínimo de material amorfo y perfeccionar su purificación.

En general, el proyecto continuará enfocado a la remediación y abatimiento de la contaminación atmosférica.

Laboratorio de Catálisis y Materiales. ESIQIE-IPN*

Miguel A. Valenzuela,** Salvador Alfaro**

*Era aquel un influjo tan poderoso que creí que de las páginas
del libro emanaba una luz que se reflejaba en mi cara:
Una luz brillantísima que al mismo tiempo cegaba mi mente y la hacía refulgir.
Pensé que con aquella luz podría hacerme de nuevo a mí mismo,
noté que con aquella luz podría salir de los caminos trillados,
en aquella luz sentí las sombras de una vida que conocería
y con la que me identificaría más tarde.*

Orhan Pamuk; *La vida nueva* (1994)

RESUMEN: El Laboratorio de Catálisis y Materiales perteneciente a la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), se fundó en 1981 con el fin de realizar investigación básica y aplicada en el desarrollo de nuevos materiales catalíticos para la industria de refinación y petroquímica. En el presente trabajo se hace un recuento histórico en cuanto a las actividades de investigación realizadas en el marco de materiales catalíticos nanoestructurados. Se presenta la evolución de las líneas de investigación y los proyectos llevados a cabo, la infraestructura disponible, la productividad del grupo, las colaboraciones internas y externas, así como las actividades de docencia y formación de recursos humanos. Finalmente, se describen los principales logros alcanzados por el grupo y se vislumbra las perspectivas de investigación requerida en áreas de energía, industria química y medio ambiente (programa ENIQMA).

PALABRAS CLAVE: ESIQIE-IPN, líneas de investigación, fotocatálisis, nanocatalizadores heterogéneos, nanocompositos.

ABSTRACT: The catalysis and materials laboratory belonging to the Higher School of Chemical Engineering and Extractive Industries (ESIQIE, Spanish acronym) of the National Polytechnic Institute (IPN) was founded in 1981 in order to carry out basic and applied research in the development of new catalytic materials for the refining and petrochemical industry. In the present work, a historical account is made regarding the research and technological development activities that have been carried out in the framework of nanostructured catalytic materials. It presents the evolution of research lines and performed projects, available infrastructure, group

Recibido: 23 de enero de 2017. Aceptado: 7 de marzo de 2017.

* A todos los estudiantes, colegas, autoridades y amigos que han aportado su granito de arena para el surgimiento, evolución y renovación permanente del LaCaMa. Indudablemente, el apoyo económico del IPN (SIP, COFAA), del CONACYT, IMP, el soporte técnico del Centro Nano del IPN (CNMN) han sido piezas clave para el equipamiento y el desarrollo de los proyectos. Finalmente, se agradece el apoyo del Ing. Robin Pérez Sánchez en la elaboración del material gráfico.

** Laboratorio de Catálisis y Materiales. ESIQIE-Instituto Politécnico Nacional. Zacatenco, C.P. 07738, Cd. Mx., México. Tel: 5729 6000 / 55112.

Correspondencia: (mavalenz@ipn.mx), (salfahdez@yahoo.com).

productivity, internal and external collaborations, as well as teaching and human resources training activities. Finally, the main achievements of the group are described and the prospects for research required in the areas of energy, chemical industry and environment are outlined (ENIQMA program).

KEYWORDS: ESIQIE-IPN, research lines, photocatalysis, heterogeneous nanocatalysts, nano-composites.

Introducción¹

La dirección de investigación dependiente de la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional (IPN) es la entidad encargada de coordinar, implementar, promover, supervisar y difundir las actividades de investigación científica y tecnológica desarrolladas en el instituto, coadyuvando a la formación de científicos, tecnólogos y personal altamente capacitado, encaminado a generar nuevos conocimientos, impulsar el desarrollo e innovación tecnológica del sistema productivo y de servicios, contribuyendo a mejorar la calidad de vida de la sociedad y al desarrollo sustentable del país.

Para llevar a cabo las diferentes tareas en materia de investigación científica y tecnológica que requiere el instituto se cuenta con diferentes escuelas, centros y unidades que apoyan estas labores. Particularmente, la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE) cuenta con la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI), la cual coordina las labores de investigación y docencia en 2 programas de maestría en ciencias en ingeniería química e ingeniería metalúrgica, y 3 doctorados en ciencias en metalurgia y materiales, en ingeniería química y en nanociencias y micronanotecnologías.

Historia^{2, 3}

El origen de las maestrías en ingeniería química e ingeniería metalúrgica data de 1963, cuando se iniciaron los primeros intentos para su establecimiento en la ESIQIE, fueron aceptadas oficialmente en 1968. Estaban integradas en la sección de graduados fundada mediante un convenio que el Gobierno de la República suscribió con la UNESCO con el fin de formar personal docente e investigadores en las áreas química y metalúrgica.

En 1969 se creó el Departamento de Investigación de la ESIQIE con el objeto de promover, coordinar y difundir los trabajos de investigación, tanto a nivel licenciatura como de maestría. El apoyo de la UNESCO consistió en la contratación de profesores expertos de diferentes países, además de la donación de equipos y libros.

¹ <<http://www.investigacion.ipn.mx/Paginas/Inicio.aspx>>.

² El contenido de esta sección se tomó de la semblanza histórica de la sección de graduados escrita por el Dr. Enrique Arce Medina, a quién se agradece profundamente su aportación.

³ <<http://www.sepi.esiqie.ipn.mx/Paginas/Inicio.aspx>>.

El Laboratorio de Investigación de la Sección de Graduados (LISG), inició sus actividades en 1981 con proyectos relacionados con procesos catalíticos para la industria de refinación y petroquímica, enfocados al desarrollo de catalizadores y estudios cinéticos en isomerización, deshidrogenación y eterificación, por encargo y financiamiento de Petróleos Mexicanos. Posteriormente, en 1982, se gestó un nuevo laboratorio dedicado al estudio de nuevos catalizadores para la industria petrolera para la isomerización de parafinas ligeras, deshidrogenación de compuestos aromáticos y transformación de alcoholes, entre otros.

A partir de 1995, se creó un grupo de investigación en catálisis y materiales con el fin de definir las líneas de trabajo que permitieran la integración de profesores y estudiantes, así como la infraestructura disponible en los laboratorios existentes. Se inició con un programa de investigación, financiado originalmente por el IPN, consistente en los siguientes proyectos:

- Desarrollo y aplicaciones de catalizadores metálicos soportados.
- Deshidrogenación de metanol con catalizadores básicos.
- Desarrollo y aplicaciones de membranas reactivas.
- Desarrollo y aplicaciones de materiales cerámicos empleados en la industria nuclear.
- Desarrollo y aplicaciones de materiales tipo arcillas pilareadas y tipo hidrotalcitas.
- Preparación de catalizadores por el método de depósito químico en fase vapor.

Durante este periodo se tuvo una colaboración muy estrecha con la Escuela Superior de Física y Matemáticas (ESFM) del IPN, Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) y la Universidad de California-Davis.

Finalmente, en 1997, se fundó el Laboratorio de Catálisis y Materiales (LaCaMa) perteneciente a la SEPI-ESIQIE, contando con 4 proyectos externos financiados por el CONACYT, Pemex y el IMP:

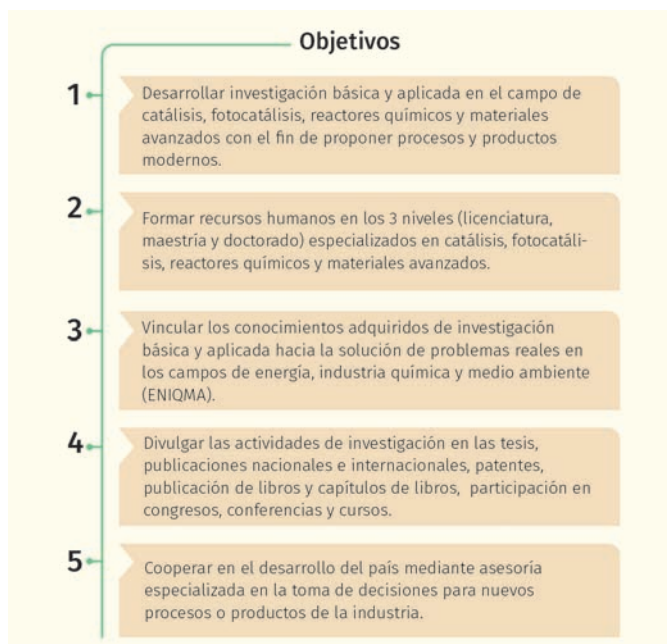
- Estudio de catalizadores bimetálicos utilizados en la deshidrogenación de hidrocarburos. CONACYT, 1996-1998.
- Deshidrogenación de hidrocarburos: estudio de nuevos catalizadores y de procesos con membranas reactivas. FIES-IMP, 1997-1999.
- Estudio de nuevos soportes para cúmulos metálicos. CONACYT-NSF, 1998-1999.
- Desarrollo de prototipos de catalizadores a base de arcillas pilareadas o zeolitas estereoselectivas, para la reacción de obtención de aditivos oxigenados. PEMEX-IMP-IPN, 1998-1999.

Segunda época (1999-2016)

En este periodo se iniciaron nuevas líneas de investigación orientadas a la producción catalítica de hidrógeno, hidro-isomerización y desulfuración oxidativa de hidrocarburos, conversión de biomasa, fotosíntesis artificial, adsorción/separación de hidrógeno y CO_2 , nuevos métodos de síntesis para adsorbentes y catalizadores, química verde, degradación de contaminantes orgánicos y síntesis orgánica mediante fotocatalisis. A continuación se enlistan algunos ejemplos de proyectos financiados:

- Síntesis por irradiación de microondas de arcillas pilareadas, caracterización y evaluación en catálisis y adsorción. CONACYT, 2000-2001.
- Estudio de la combustión catalítica de disolventes en una esmaltadora SEM. Condumex. 2006-2007.
- Oxidación fotocatalítica de olefinas empleando semiconductores irradiados con luz visible. CONACYT. 2009-2010.
- Producción, purificación y almacenamiento de hidrógeno utilizando materiales porosos. CONACYT, 2010-2013.
- Conversión fotocatalítica del CO_2 mediante semiconductores metalizados. CONACYT. 2012-2016.

FIGURA 1. Objetivos centrales del LaCaMa.



Líneas de investigación

Como se puede observar en la figura 2, las líneas de investigación actuales están enfocadas en 3 ejes temáticos, energía, industria química, medio ambiente (ENIQMA) para las cuales se muestra la interrelación con la demanda de nanomateriales y el diseño de microrreactores para las reacciones catalíticas y fotocatalíticas en estudio.

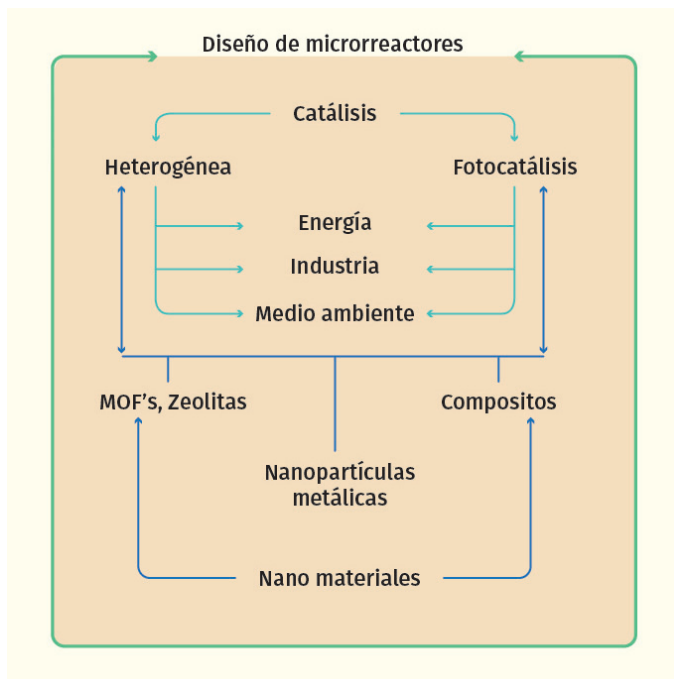


FIGURA 2. Ejes temáticos de investigación (programa ENIQMA).

A continuación se desglosan los temas de investigación desarrollados en la última década y los propuestos a corto plazo en el programa ENIQMA.

Producción de hidrógeno

La deshidrogenación de hidrocarburos tales como, metano, propano, butano e isobutano se ha estudiado con una variedad de catalizadores heterogéneos tipo metales soportados en óxidos mixtos. La desintegración de metano para producir hidrógeno libre de CO y nanoestructuras de carbono mediante catalizadores de níquel soportado en sílice mesoporosa y otros materiales es la ruta con mayores posibilidades para un desarrollo comercial. Sin embargo, considerando la disponibilidad de biometano y de CO₂, como desecho industrial, hemos iniciado el estudio de la reformación seca (*dry reforming*) para la

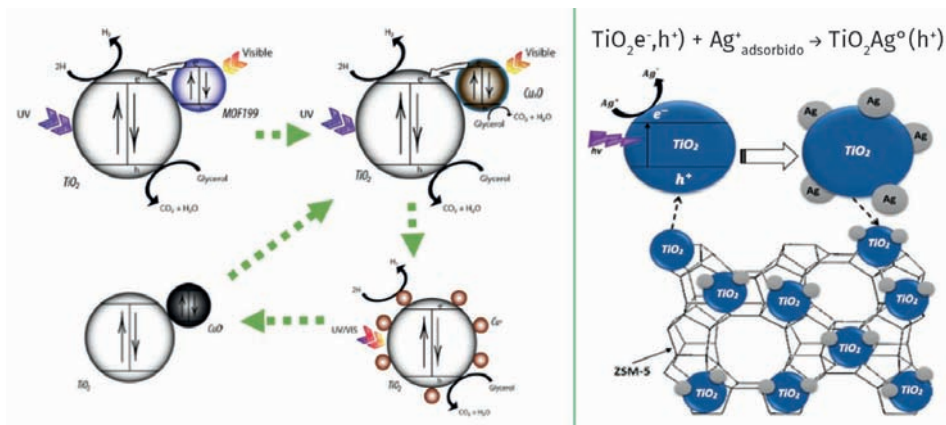


FIGURA 3. Algunos ejemplos de nanomateriales utilizados en la foto-reformación de glicerol (izquierda: composito MOF199-TiO₂; derecha: composito Ag-TiO₂-zeolita).

producción de gas de síntesis, utilizando nanopartículas de Ni soportadas en nanocompositos básicos. La producción de hidrógeno, también la hemos estudiado vía la foto-reformación de alcoholes (i.e. metanol, etanol, glicerol) utilizando compositos semiconductor-MOF (*basolite*) y compositos ternarios tipo Ag-semiconductor-zeolita. Actualmente, se investigan nanoestructuras tipo núcleo-coraza (*core-shell*), tales como Cu_xO/TiO₂ y NiO/TiO₂ aplicados a la descomposición fotocatalítica del agua (*water splitting*) empleando luz visible.

Conversión de biomasa

Los estudios de conversión de biomasa se han enfocado hacia la gasificación y pirólisis catalítica de residuos agrícolas (i.e. fibra de coco, cáscara de naranja) para la obtención de hidrógeno y olefinas utilizando compositos tipo Ni-CeO₂/silicatos de Fe y Mg y catalizadores Ni/SiO₂ promovidos con óxidos básicos. Adicionalmente, se dispone de compositos semiconductor-zeolita y semiconductor-MOF que se utilizarán en la fotooxidación selectiva de glucosa hacia los ácidos glucárico y glucónico.

Degradación de contaminantes orgánicos e inorgánicos

Este campo de investigación lo hemos abordado mediante fotocátalisis heterogénea para la degradación de cromo hexavalente, fenoles, compuestos poliaromáticos y colorantes, en fase líquida. Se utilizaron diversos materiales tales como titanía nanoestructurada, compositos tipo Fe₂O₃/TiO₂, CuO/ZnO, etc. También se han utilizado perlas de vidrio recubiertas con películas delgadas de TiO₂ y compositos ternarios Ag-TiO₂/zeolitas en la mineralización fotocatalítica de disolventes. Actualmente, se estudian nanocompositos tipo semiconductor/grafeno y ZnO-metal-semiconductor, ZnO-carbono,

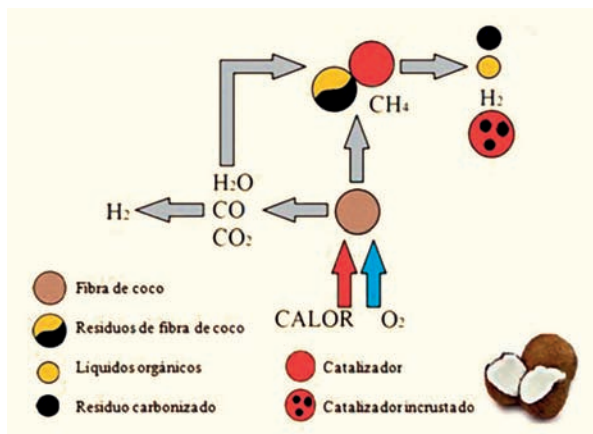


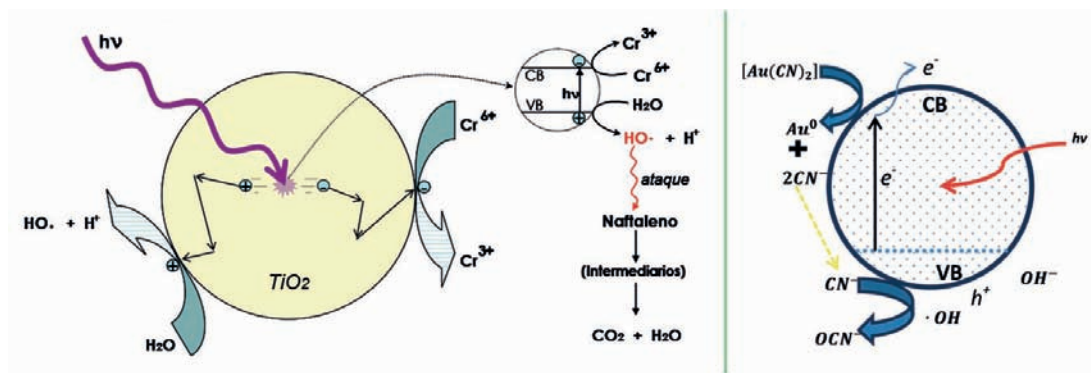
FIGURA 4. Trayectoria de reacción en la gasificación de fibra de coco mediante catalizadores Ni-Ce/olivina.

WO_3 -zeolita, $\text{CeO}_2\text{-TiO}_2$, Bi-TiO_2 preparados por métodos de sol-gel, solvotérmicos, fotoquímicos y de molienda mecánica para procesos foto-redox en especies iónicas de metales pesados y contaminantes emergentes. Por otro lado, se ha empleado la ozonación catalítica con óxidos de níquel soportados en diversas nanoestructuras, i.e., alúmina, sílice y titania, para la degradación de pesticidas.

Captura, separación y conversión del CO_2

Una de las líneas de investigación de LaCaMa se encarga de la purificación de gases, mediante la separación y captura, principalmente hidrógeno, metano

FIGURA 5. Diagramas conceptuales que muestran la degradación simultánea de cromo hexavalente y naftaleno (izq.) y la degradación de un complejo Au-cianuro (der.).

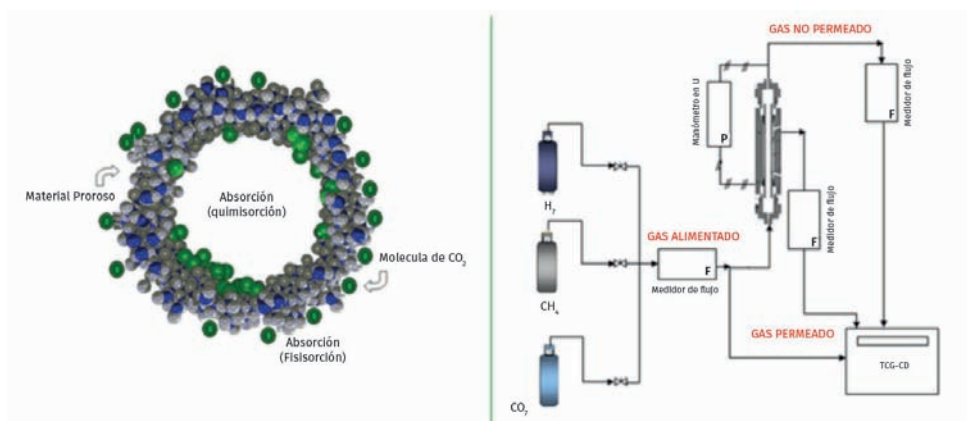


en el caso de la separación y CO_2 tanto en separación como en captura utilizando materiales inorgánicos porosos como son zeolitas, sílice mesoporosa, óxidos metálicos a base de aluminio, titanio y metales como paladio. En el caso de la purificación de gases se fabrican membranas selectivas, utilizando soportes tubulares porosos, sobre los cuales se depositan capas delgadas de zeolita, o paladio, dependiendo el gas que se quiera separar. Con respecto a la captura de CO_2 se preparan materiales en forma de polvos a base de zeolita y sílice mesoporosa que a su vez se impregnan con cationes de tipo alcalino como son litio, sodio, etc. De forma tal que interactúen con el gas ácido (CO_2) y llevar a cabo la fisisorción o quimisorción dependiendo de la temperatura de captura, los procesos anteriores se realizan en una balanza termogravimétrica.

La conversión del CO_2 se ha estudiado por 2 rutas: catalítica y fotocatalítica. Por la primera ruta, se inició con la hidrogenación selectiva de CO_2 hacia metano (metanación o reacción de Sabatier) empleando nanopartículas de níquel soportadas en diversos materiales (alúmina, sílice y circonia). Se pretende extender el estudio hacia la obtención de metanol con el empleo de nanopartículas de cobre y soportes mixtos básicos, además de la reacción de Fischer-Tropsch hacia hidrocarburos mediante nanocompositos de cobalto y zeolitas.

Por la ruta fotocatalítica se sintetizaron nanocompositos tipo fosfato de plata/ferrita de zinc, con la idea de formar heterouniones tipo p-n y realizar la reacción con luz visible para la obtención de metano, metanol, entre otros. Además, se han estudiado sistemas fotocatalíticos tipo sulfuro de zinc decorado con nanopartículas de cobre, níquel o plata y la conversión del ZnS en ZnO nanoestructurado depositando las nanopartículas mencionadas, con el fin de obtener selectivamente metano, al reaccionar el CO_2 con el agua en medio básico (fotosíntesis artificial).

FIGURA 6. Esquema de sorción de CO_2 en un material poroso, adaptada de <<http://www.see.ed.ac.uk/research/IMP/images>> (izq.) y esquema de un sistema de permeación y separación de gases (der.).



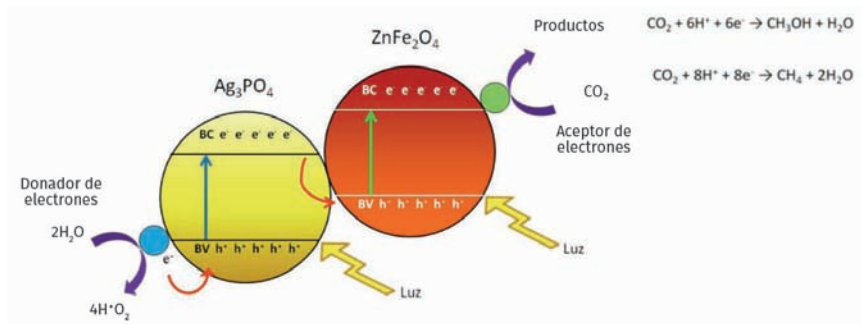
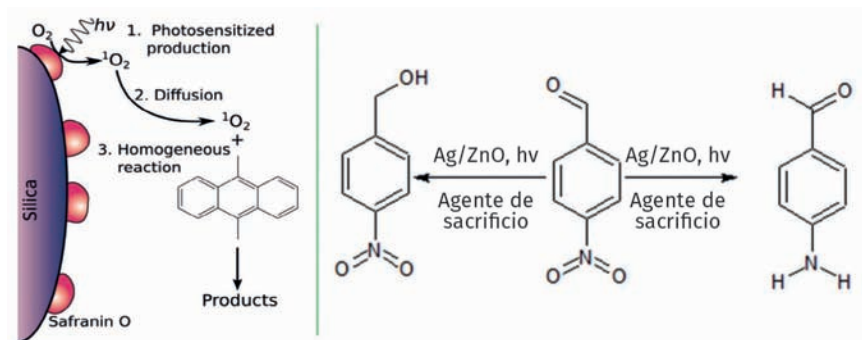


FIGURA 7. Diagrama conceptual que muestra la reducción fotocatalítica de CO_2 en presencia de agua mediante compositos $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ /co-catalizadores (esferas verde y azul).

Síntesis de químicos finos

Este tema lo hemos estudiado empleando fotocatalizadores heterogéneos, principalmente titanía nanoestructurada y decorada con metales nobles en la reducción selectiva de nitrobenzeno hacia anilina y de alcohol bencílico hacia benzaldehído, además de la oxidación selectiva de olefinas. Por otro lado, hemos estudiado reacciones de oxigenación selectiva de poliaromáticos mediante sílice sensibilizada con colorantes que al irradiarse con luz visible produce oxígeno singlete, que es la especie de oxígeno que se inserta en el compuesto orgánico. Actualmente, la investigación la dirigimos hacia la obtención de catalizadores plasmónicos (e.g. Ag/ZnO , Au/ZnS , entre otros) utilizando métodos fotoquímicos para el depósito de nanopartículas (1-2 nm) sobre diversos semiconductores y con aplicaciones en reacciones de fotorreducción, fotooxidación y fotopolimerización de compuestos orgánicos.

FIGURA 8. Diagramas conceptuales que muestran la oxigenación de un compuesto poliaromático (9, 10, DMA) mediante oxígeno singlete (izq.), y las rutas de reacción en la reducción/oxidación fotocatalítica de p-nitrofenol (der.).



Contribuciones y logros

A lo largo de los 35 años de actividades en catálisis heterogénea en la ESIQIE del IPN se han realizado proyectos de investigación básica y aplicada enfocados a las demandas de nuevos procesos en campos de la energía, industria química, medio ambiente, química verde, entre otros. Aunque la mayor parte de los proyectos realizados con financiamiento externo están orientados al sector público, se ha intentado la integración con el sector privado. La contribución a la generación de conocimiento científico y la formación de recursos humanos han sido la parte medular del grupo, adicionalmente a la difusión de nuestras investigaciones y las patentes otorgadas (figura 9).

Infraestructura

Desde su fundación en 1997, el LaCaMa se ha dividido en 3 áreas de trabajo: síntesis, caracterización y evaluación, en la figura 10 se muestran algunos equipos representativos.

Perspectivas

Es bien conocida la importancia que tienen los catalizadores en la producción de combustibles, en el control ambiental y en la obtención de químicos finos. Quizás los ejemplos más notables sean la producción de gasolinas, el desarrollo de los convertidores catalíticos y la síntesis amoníaco, por mencionar los más relevantes. Lo anterior ha conducido al empleo de una gran variedad de catalizadores para la obtención de una gama de productos de uso cotidiano: fármacos, detergentes, fibras poliméricas, perfumes, combustibles, pinturas, lubricantes, etc. Por tal motivo, es importante resaltar que el 80-85% de los productos obtenidos por la industria química emplean un catalizador en alguna de las etapas del proceso.

FIGURA 9. Producción científica y formación de recursos humanos.



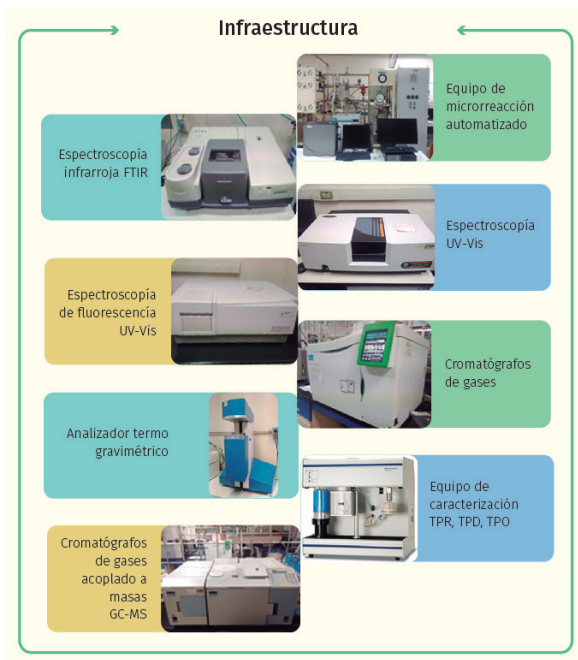


FIGURA 10. Infraestructura disponible en el LaCaMa.

FIGURA 11. Colaboraciones de la ESIQIE-IPN con universidades y centros de investigación.



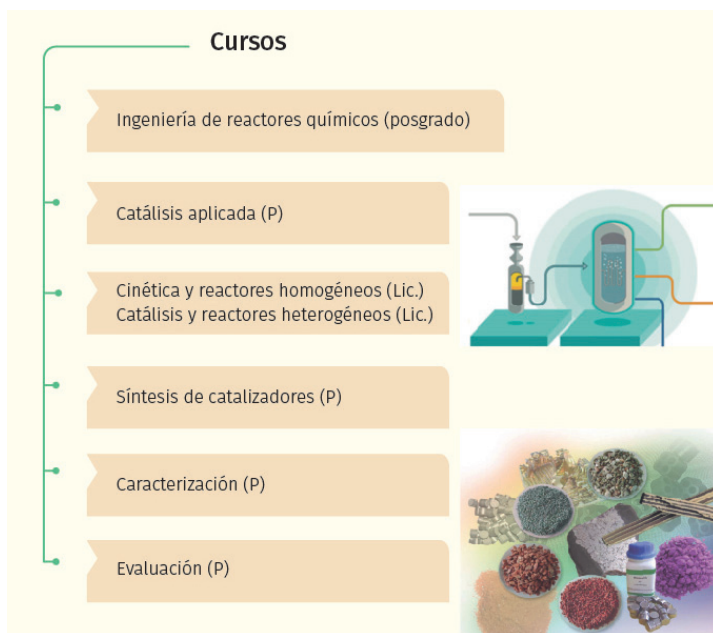


FIGURA 12. Cursos impartidos por el grupo de investigadores del Lacama.

En las últimas décadas, ante la necesidad de llevar a cabo las reacciones químicas de la manera más efectiva, es decir, con una elevada actividad, selectividad, estabilidad, bajo consumo energético, sin emisión de contaminantes, tiempos cortos de reacción y de la manera más económica, surge la necesidad de desarrollar nuevos “catalizadores a la medida” (*tailored catalysts*). Pensando en el futuro, tendremos que diseñar nanocatalizadores para atender las 3 grandes reacciones que podrían ser las más importantes para resolver problemas urgentes de la humanidad: la transformación del CO_2 en combustibles y/o químicos finos, la conversión del agua en hidrógeno/oxígeno y la reducción del nitrógeno a amoníaco (*nitrogen fixation*), evidentemente, bajo los conceptos arriba mencionados (*green chemistry*).

“La nanotecnología nos salvará de un colapso global” y “la nanotecnología es la revolución científica más importante del siglo XXI” (*vox populi*), nos conduce irremediablemente al desarrollo de nanocatalizadores, de materiales nanoporosos, de nanocompositos, por mencionar algunos. Sin lugar a dudas, una de las demostraciones más importantes de las aplicaciones de la nanociencia y la nanotecnología, fue en el área de catálisis, en la obtención de nanopartículas (5-20 nm) de metales nobles, mostrando una mayor actividad catalítica con la reducción en su tamaño y forma.

En la última década, se utiliza con mayor frecuencia el término nanocatálisis, el cual se define como el empleo de materiales nanoestructurados

que, eventualmente, presentarían una mayor actividad, selectividad y estabilidad, en comparación con materiales convencionales (sin tamaño nanométrico uniforme). Además, se arguye que los nanocatalizadores exhiben propiedades cuasihomogéneas y cuasiheterogéneas, lo que explicaría las mejores propiedades catalíticas con respecto a los catalizadores convencionales.

Por lo anterior expuesto, aun cuando la naturaleza no tenga prisa por realizar sus procesos cotidianos, nosotros tenemos que utilizar todos los avances teóricos y experimentales de la nanociencia, nanotecnología y ciencias afines (física-química-biología) para diseñar, comprender y escalar los nanomateriales potenciales para llevar a cabo las reacciones y/o procesos para el futuro, a partir de los reactantes CO_2 , H_2O , biomasa y N_2 , y que, desafortunadamente, no se pueden llevar a cabo sin la presencia de los preciados materiales a nanoescala.

A continuación se presenta una lista al azar de algunos temas candentes que podrían generar una sinergia de colaboración entre los grupos nacionales dedicados a la investigación en nanocatálisis:

- Síntesis orgánica mediante nanocatalizadores híbridos tipo óxidos de hierro-metales nobles.
- Síntesis directa de peróxido de hidrógeno utilizando oxígeno e hidrógeno como reactantes y nanocatalizadores de paladio.
- Reducción electrocatalítica del oxígeno mediante nanoestructuras tipo núcleo@coraza.
- Mineralización de contaminantes persistentes mediante nanocatalizadores utilizando las diferentes modalidades del proceso Fenton.
- Desarrollo de nanocatalizadores a base de sílice/silicatos/materiales microporosos (MOFs) aplicados en síntesis orgánica.
- Desarrollo de nanocompositos semiconductores para la degradación de contaminantes bajo luz visible.
- Desarrollo de nanocatalizadores para el acoplamiento de la foto-reducción del CO_2 con la foto-oxidación del agua (fotosíntesis artificial).
- Descomposición fotocatalítica del agua mediante luz visible/infrarroja.
- Estudio de fotocatalizadores plasmónicos (Ag, Au, Cu) en reacciones de síntesis orgánica.
- Desarrollo de nanoadsorbentes/nanocatalizadores para la captura y conversión del CO_2 .

Catálisis en el Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, UAEM-UNAM*

Dora Alicia Solís-Casados,** Reyna Natividad-Rangel,**
Rubí Romero Romero,** Rosa María Gómez-Espinosa****

RESUMEN: Describimos aquí las actividades de investigación en el área de catálisis realizadas por algunas investigadoras de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México, adscritas al Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, UAEM-UNAM. Se incluyen las líneas de investigación que desarrollan, las contribuciones que han generado y los logros en este campo obtenidos en los últimos años. También se presenta información sobre la infraestructura con que se cuenta en el CCIQS y en la Facultad de Química para llevar a cabo investigación sobre catálisis; la importancia que tienen los trabajos de colaboración nacional e internacional, así como, la formación de recursos humanos altamente especializados en esta área. Por último, presentamos las perspectivas de investigación y desarrollo planteadas para el campo de la catálisis.

PALABRAS CLAVE: Catálisis, nanocatálisis, fotocátalisis, energías limpias, medio ambiente, bio-combustibles.

ABSTRACT: This manuscript describes the research activities in the area of catalysis that are carried out by researchers from the Faculty of Chemistry of the Autonomous University of the State of Mexico and are affiliated to the Joint Center for Research in Sustainable Chemistry (Spanish acronym: CCIQS, UAEM-UNAM). It includes the lines of research that they develop, the contributions they have generated and the achievements in this field in the last years. It also presents information on the infrastructure that is available in the CCIQS and in the Faculty of Chemistry to carry out research on catalysis. It is also included the importan-

Recibido: 13 de febrero de 2017. Aceptado: 27 de marzo de 2017.

* Deseamos expresar nuestro más profundo agradecimiento al CONACYT por los apoyos brindados para no solamente realizar investigación en el área de catálisis sino también por el apoyo recibido para la formación de recursos humanos altamente especializados y por el SNI. En el mismo contexto, extendemos el agradecimiento a PRODEP, UAEM y UNAM. Por otro lado, también queremos agradecer a nuestros compañeros del CCIQS UAEM-UNAM, quienes nos han apoyado en las diferentes cuestiones técnicas implícitas en nuestros proyectos: M.C. Alejandra Núñez, M.C. Lizbeth Triana, Dr. C. Uvaldo Hernández, Dra. Melina Tapia y Lic. Citlalit Martínez Soto. Finalmente, a nuestros estudiantes y pares que han tenido confianza en nuestros proyectos y han contribuido de manera importante a la calidad de nuestros productos académicos y científicos.

** Cuerpo Académico en Ciencia de Materiales, Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS), UAEM-UNAM, Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México. Correspondencia: (solis_casados@yahoo.com.mx).

*** Cuerpo Académico en Ingeniería Química, (CCIQS), UAEM-UNAM. Correspondencia: (reynanr@gmail.com).

**** Cuerpo Académico en Química de Coordinación, (CCIQS), UAEM-UNAM. Correspondencia: (rosamarigo@gmail.com).

ce of national and international collaboration, as well as the training of highly specialized human resources in this area. We present the perspectives of research and development that we propose in the field of catalysis.

KEYWORDS: Catalysis, nanocatalysis, photocatalysis, clean energy, environment, biofuels.

Introducción

La Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) se creó en 1970 con el nombre de Instituto en Ciencias Químicas impartiendo las primeras clases en las instalaciones de la Facultad de Medicina de la misma universidad, posteriormente en el año de 1975, se llamó Escuela de Ciencias Químicas, inaugurándose el actual edificio ubicado en Paseo Colón Esquina con Paseo Tolloca en la Ciudad de Toluca del Estado de México. En esos años solo se impartían las carreras de químico y químico farmacéutico biólogo, creándose en el año de 1978 la carrera de químico en alimentos, siendo la docencia la principal actividad de la Escuela en Ciencias Químicas en esa época, la enseñanza en el posgrado comenzó en 1985 con la maestría en ecología, dando inicio a las actividades de investigación en el área de química en este espacio universitario. Estas actividades de investigación se han visto fortalecidas con el transcurso del tiempo y las contrataciones de personal como profesores de tiempo completo de la UAEM, de manera adicional estas actividades de investigación se han visto incrementadas con la firma de un convenio entre la Facultad de Química de la UAEM y el Instituto de Química de la UNAM, el 24 de mayo de 2007, haciendo posible la creación de un Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS), en el convenio se menciona que en el CCIQS UAEM-UNAM <<http://www.cciqs.unam.mx>> debe haber: “Una relación donde ambas universidades compartan riesgos, afronten problemas-retos y colaboren en actividades académicas de docencia e investigación, todo lo anterior de manera conjunta. En este modelo se concibe a la UNAM como una institución de apoyo y no de competencia con la Facultad de Química de la UAEM durante un tiempo determinado en el convenio de colaboración”. El día 9 de septiembre de 2008 se inauguró el CCIQS UAEM-UNAM (figura 1), en la actualidad se encuentran adscritos a este centro 18 profesores de tiempo completo pertenecientes a la UAEM y 8 investigadores pertenecientes a la UNAM. De la misma manera, fueron integrándose 7 técnicos académicos por la UNAM en apoyo al manejo de infraestructura especializada. Se pretende que este personal académico lleve a cabo actividades de investigación enfocadas principalmente a la química sustentable, donde destacan la ciencia de materiales, la nanociencia, la nanotecnología, la electroquímica, química del estado sólido, fisicoquímica teórica, remediación de agua y los procesos de oxidación avanzada.



FIGURA 1. Fachada del CCIQS, UAEM-UNAM.

Líneas de investigación, desarrollo e innovación relacionadas con la catálisis

El personal de investigación se ha agrupado en torno a 6 líneas principales, fisicoquímica, ingeniería química, química de materiales, química inorgánica, química ambiental y química orgánica; algunas investigadoras han desarrollado, en las líneas de ingeniería química, química de materiales y química inorgánica, su investigación enfocada en el área de catálisis, principalmente en reacciones de catálisis heterogénea, y en algunos casos se ha desarrollado catálisis homogénea. Las líneas de investigación que se desarrollan e impactan el área de catálisis son la de síntesis caracterización y desarrollo de materiales con aplicaciones catalíticas, mineralización de compuestos orgánicos mediante fotocatalisis heterogénea, foto-oxidación selectiva de compuestos orgánicos (glicerol, alcoholes), foto-reducción catalizada de CO_2 , fotofenton y ozonación catalizada, la modificación de catalizadores homogéneos con ligantes estibínicos con aplicación en la reacción de amidocarbonilación, heterogenización de un catalizador homogéneo.

Investigación y desarrollo

En la facultad de Química de la UAEM se ha desarrollado investigación usando catalizadores en reacciones principalmente homogéneas por algunos profesores del área de química orgánica, investigaciones fortalecidas con la llegada de la Dra. Rosa María Gómez Espinosa en el año 2004, quien se incorpora a tra-

vés del programa de repatriación del CONACYT. La investigación en catálisis heterogénea dio inicio en el año 2003 con la Dra. Rubí Romero Romero, quien se reincorporó tras terminar los estudios de doctorado, incorporándose a la Facultad de Química de la UAEM; en 2005, la Dra. Reyna Natividad Rangel y en 2006 la Dra. Dora Alicia Solís Casados, esta última a través del programa de Retención del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Estas investigadoras, a partir de 2003 a la fecha, han desarrollado proyectos de investigación en el área de catálisis heterogénea principalmente en el desarrollo de materiales catalíticos, fotocatalíticos, caracterización física y química de los mismos, así como el estudio de los parámetros cinéticos y la evaluación de la actividad catalítica, optimizando en algunos casos el sistema de reacción.

En orden cronológico, la Dra. Rosa María Gómez Espinosa, perteneciente al Cuerpo Académico de Química de Coordinación, ha dedicado estos últimos 12 años de investigación científica a desarrollar catalizadores soportados en matrices poliméricas, obteniendo como principal logro la modificación de catalizadores homogéneos con ligantes estibínicos con aplicación en la reacción de amidocarbonilación y la heterogenización de un catalizador homogéneo. La Dra. Gómez ha desarrollado numerosos proyectos (PRODEP, CONACYT, SIYEA) que inciden en el área catalítica, lo cual se ve reflejado en los numerosos artículos publicados entre los que destacan los publicados en una revista alemana en el año 2000 [1] y en el *Journal of Molecular Catalysis* en los años 2001, 2004 y 2008 [2-4]; adicionalmente, publicó un capítulo titulado "Catalizadores soportados" en el libro *Tópicos en materiales*. En el tema de formación de recursos humanos, 19 estudiantes de licenciatura pertenecientes a la Facultad de Química se han recibido, y en el posgrado se han graduado 10 altamente especializados en la maestría, y 5 doctores.

La Dra. Natividad es miembro del Cuerpo Académico Consolidado de Ingeniería Química y adscrita al CCIQS, ha invertido gran esfuerzo en cultivar las líneas de investigación como fotooxidación selectiva de compuestos orgánicos, fotorreducción catalizada de CO_2 , mineralización de compuestos orgánicos mediante fotocatalisis heterogénea, fotofenton y ozonación catalizada [5-8]. Ha dirigido numerosos proyectos de investigación financiados por la UAEM, PROMEP y CONACYT, entre otros, con lo cual ha adquirido la infraestructura necesaria para llevar a cabo las actividades de investigación en las líneas mencionadas, fortaleciendo el equipamiento básico del laboratorio con la adquisición y puesta en operación de tres fotorreactores de 100 mL, dos fotorreactores de 1L, una columna de burbujeo de 14L y una columna de burbujeo de 4L (figuras 2-3), un analizador de carbono orgánico total (COT) Shimadzu. Esta infraestructura le ha permitido formar recursos humanos especializados en el área de catálisis, trabajo reflejado en la dirección de 33 tesis: 16 de licenciatura en ingeniería química, 14 de maestría y 13 de doctorado en ciencias químicas; la Dra. Natividad ha publicado a la fecha 50 artículos en revistas indizadas, 4 capítulos de libro, y cuenta con dos solicitudes de patente en proceso. Es importante resaltar que la Dra. Natividad ha fortalecido las colaboraciones con in-

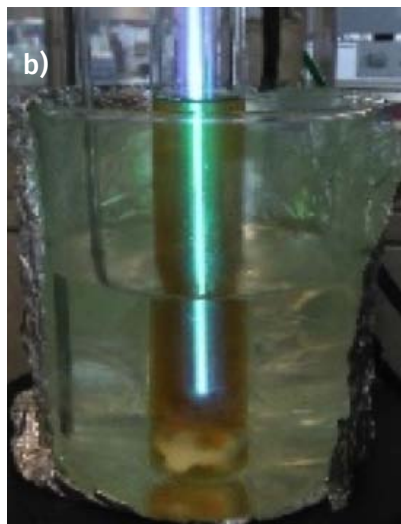


FIGURA 2. Columna de burbujeo: reactor fotocatalítico y/o electroquímico.

investigadores adscritos a instituciones dentro de la república mexicana citándose la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el Instituto Mexicano del Petróleo, la Universidad Nacional Autónoma de México y ha trabajado fuertemente en otras colaboraciones con instituciones en el extranjero destacándose la University of Birmingham y University of Loughborough del Reino Unido, así como la Universidad Politécnica de Valencia, España. Es importante resaltar que la Dra. Natividad ha recibido varias distinciones nacionales como internacionales por su destacada labor en el área de catálisis heterogénea. En 2015, fungió como presidente del XIV Congreso Mexicano y V Congreso Internacional de Catálisis. Actualmente, es vocal del consejo directivo de la Academia de Catálisis.

La Dra. Rubí Romero pertenece al Cuerpo Académico de Ingeniería Química y ha fortalecido la línea de investigación de catálisis e ingeniería

FIGURA 3. a) Reactor STR con condensador para la producción de biodiesel mediante la transesterificación de aceites vegetales catalizada heterogéneamente; b) fotorreactor STR para la evaluación catalítica de fotocatalizadores.



de las reacciones químicas en el CCIQS. Ha dirigido al menos diez proyectos de investigación financiados por instituciones como la UAEM, SEP- PROMEP, CONACYT-ciencia básica y uno de cooperación internacional financiado por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha y Fondos FEDER. 2007-2009. Es importante resaltar que los recursos recibidos han incidido de manera directa en fortalecer las actividades de catálisis, debido a que han permitido adquirir infraestructura como lo son los reactores tipo Batch y algunos reactores fotocatalíticos en escala laboratorio. En el marco de estos proyectos se han formado recursos humanos especializados, graduándose 15 alumnos de nivel licenciatura, 7 alumnos de la maestría en ciencias químicas y 3 alumnos de doctorado. Derivado del trabajo de investigación la Dra. Romero ha publicado más de 30 artículos en revistas indizadas, y recibido distinciones tanto nacionales como internacionales por su destacada labor en el área catalítica [9-16]. En 2015, participó en el comité organizador del XIV Congreso Mexicano y V Congreso Internacional de Catálisis.

La Dra. Dora Alicia Solís Casados ha cultivado la línea de investigación en catálisis heterogénea, llevando a cabo investigación en la síntesis, caracterización y desarrollo de materiales porosos, nanoestructuras, nanopartículas y de manera adicional ha trabajado en la obtención de materiales a base de óxidos metálicos en forma de película delgada. De estos materiales, ha evaluado su actividad catalítica en reacciones fotocatalíticas y en algunos casos en reacciones de hidrodesulfuración selectiva. Ha dedicado gran parte de sus actividades de investigación al desarrollo y caracterización de películas delgadas de óxidos de metales de transición obtenidos a partir de soluciones de sol-gel y depositadas usando el depósito por giro (*spin coating*), materiales modificados sensibles a la luz solar y que ha evaluado en la degradación fotocatalítica de compuestos orgánicos en aguas residuales. Como resultado de sus actividades de investigación, ha publicado más de 45 artículos en revistas indizadas [17-21]; ha formado recursos humanos altamente especializados reflejados en las tesis dirigidas, contando con 3 de licenciatura en las carreras de química e ingeniería química, 5 de maestría en ciencia de materiales y 1 de maestría en ciencias ambientales, así como 7 de doctorado. Es importante hacer notar que la Dra. Solís ha recibido distinciones nacionales y algunas internacionales por su destacada labor en el área de catálisis heterogénea. En 2015, participó en el comité organizador del XIV Congreso Mexicano y V Congreso Internacional de Catálisis. Hoy en día, es secretaria del Consejo Directivo de la Academia de Catálisis, A.C.

Infraestructura

Con el financiamiento otorgado por diversas instituciones como la misma UAEM, SEP-PROMEP y CONACYT, se ha logrado obtener recursos empleados en equipamiento para fortalecer la infraestructura disponible y con ello la obtención de mejores resultados en el área de catálisis. Se ha adquirido: un es-

pectrofotómetro UV-vis lambda 35 de Perkin Elmer (figura 4a), un simulador solar marca Science Tech (figura 4b), un reactor de fotoquímica Q-200 Marca Prendo (figura 5a), autoclave (figura 5b), microscopio óptico digital, así como lámparas ultravioleta, rotavapor (figura 6 a), horno para calcinar (figura 6 b), equipo Soxleth, pHmetro, turbidímetro, microcentrífuga, equipo de fisisorción CHEMBET 3000 y un equipo de depósito por giro (figura 7b), entre otro instrumental y equipo de laboratorio menor que le han servido de apoyo para dar seguimiento al desempeño de las formulaciones catalíticas preparadas.



FIGURA 4. a) Espectrofotómetro Lambda 35 de Perkin Elmer; b) simulador solar Science Tech.

FIGURA 5. a) Reactor de fotoquímica con lámpara UV; b) reactor de alta presión marca Prendo.





FIGURA 6. a) Rotavapor, Equipar; b) horno de convección de aire, Thermoline.

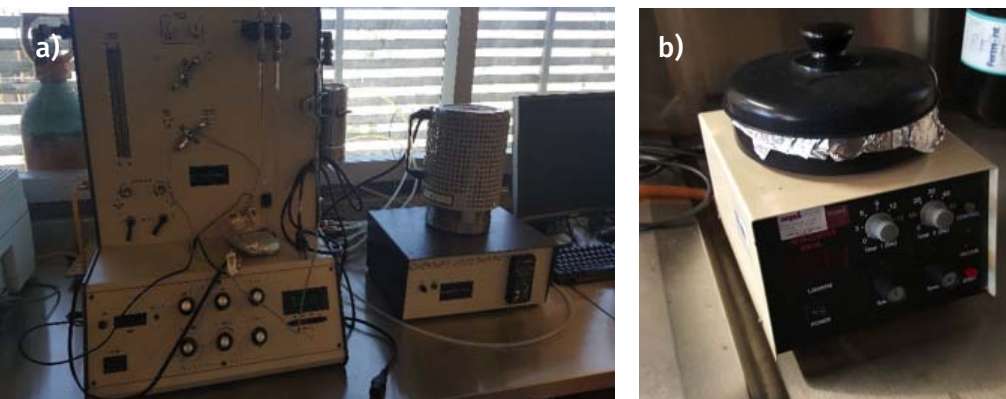


FIGURA 7. a) CHEMBET 3000, Micromeritics; b) equipo de depósito por giro.

Infraestructura disponible en el CCIQS

De manera adicional en las instalaciones del CCIQS se cuenta con infraestructura mayor con la que se puede llevar a cabo la caracterización física y química de los catalizadores que se preparan, entre los que podemos citar está el difractor de rayos X de polvos (DRX), un difractor de rayos X de monocristal, el microscopio electrónico de barrido (SEM), un microscopio electrónico de transmisión (TEM), un equipo para análisis térmico, que analiza la termogravimetría y la calorimetría diferencial de barrido (TGA/DSC), un espectrómetro

infrarrojo (IR-ATR), un equipo de resonancia magnética nuclear (NMR), un equipo de espectrometría fotoelectrónica de rayos X (XPS). El CCIQS también cuenta con una sección en la cual se dispone de equipos de cromatografía que apoyan la identificación de diferentes subproductos de reacción muy útiles en el área de catálisis. Recientemente se adquirieron tres cromatógrafos mediante el proyecto “Apoyo al fortalecimiento de la infraestructura del área de catálisis e ingeniería de reacciones del CCIQS UAEM-UNAM” teniendo como marco la convocatoria de CONACYT de apoyo a la infraestructura 2016 bajo la responsabilidad de la Dra. Natividad y con la colaboración, entre otros, de la Dra. Solís, las doctoras Gómez y Romero. Los cromatógrafos así adquiridos son un UH-PLC con detector de arreglo de diodos y con índice de refracción, un cromatógrafo de gases con detectores de ionización de flama (FID) y de conductividad térmica (TCD) y un cromatógrafo de iones. Estos equipos son excelentes para detectar y cuantificar compuestos de interés de los proyectos realizados por las autoras de este trabajo como son la fotooxidación selectiva (de glicerol) y total (de compuestos fenólicos y contaminantes emergentes) y de la fotorreducción de CO₂, producción de alcoholes, transesterificación de aceites vegetales (biodiesel) y remoción de iones.

Actividades de vinculación en el área de catálisis

La vinculación se lleva a cabo con otros investigadores en instituciones nacionales e internacionales, siendo importante resaltar el fortalecimiento de las colaboraciones con investigadores adscritos a instituciones dentro de la república mexicana citándose la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Instituto Politécnico Nacional (IPN), Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlan (TESJO), Universidad Tecnológica de Zinacantan-tepec (UTZIN), Instituto Tecnológico de Toluca (ITT), Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y otras vinculaciones de carácter internacional como la Universidad de Málaga en España (UMA), Universidad Tecnológica de Valencia en España, Universidad de Castilla-La Mancha en España (UCLM), University of Birmingham, University of Loughborough del Reino Unido y Thompson Rivers University de la Columbia Británica en Canadá. Como resultado de estas colaboraciones se han publicado artículos en revistas indizadas y en algunos casos los estudiantes han realizado estancias de investigación en alguna de estas instituciones, lo cual ha robustecido los proyectos de investigación en el marco de los cuales se desarrollan sus trabajos de tesis y los posgrados a los que pertenecen dichos estudiantes (Ciencias Químicas <<http://web.uaemex.mx/fquimica/posgrados/CQ/>>, y Ciencia de Materiales <<http://web.uaemex.mx/fquimica/posgrados/CM/>>).

Referencias

- [1]. Gómez R. M., Sharma P., Arias J. L., Pérez-Flores J., Velasco L., Cabrera A. (2001). Amidocarbonylation of cyclohexene and 1-pentene with $\text{CO}_2(\text{CO})_8$ modified with triarylstibines in very mild conditions. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 170 (1-2): 271-274, mayo 14. issn: 1381-1169.
- [2]. Cabrera A., Sharma P., Arias J. L. *et al.* (2004). Amidocarbonylation of alkenes at very low pressures with a $\text{CO}_2(\text{CO})_8/\text{SbR}_3$ system: Two easy routes to reach n-acetyl-alpha-aminoacids. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 212 (1-2): 19-23. doi:10.1016/j.molcata. 2003.11.009. ISSN: 1381-1169.
- [3]. Gómez R.M., Cabrera A., Velázquez C.G. (2007). Synthesis of stibine ($\text{sbphrr}_2\text{r}_1$ and their use as ligand in the amidocarbonylation of alkenes with $\text{CO}_2(\text{CO})_8$ as precursor. *Journal of Molecular Catalysis A-Chemical*, 274 (1-2): 65-67 2007. doi:10.1016/j.molcata.04.018. ISSN: 1381-1169.
- [4]. Salinas-Olvera, J.; Gómez, R. M.; Cortés-Guzmán, F. (2008). Structural evolution: Mechanism of olefine insertion in hydroformylation reaction. *Journal of Physical Chemistry*, 112. (13), 2906-2912, 3 abril. doi: 10.1021/jp711200n. ISSN 1089-5639.
- [5]. Hurtado L., Solís-Casados D., Escobar-Alarcón L., Romero R., Natividad R. (2016). Multiphase photo-capillary reactors coated with TiO_2 films: Preparation, characterization and photocatalytic performance. *Chemical Engineering Journal*, 304:39-47.
- [6]. L. Hurtado, R. Natividad, H. García. (2016). Photocatalytic activity of Cu_2O supported on multi layers graphene for CO_2 reduction by water under batch and continuous flow. *Catalysis Communications*, 2016, 84:30-35.
- [7]. L. Hurtado, R. Natividad, E. Torres-García, J. Farías, G. Li Puma. (2015). Correlating the photocatalytic activity and the optical properties of LiVMoO_6 photocatalyst under the UV and the visible region of the solar radiation spectrum. *Chemical Engineering Journal*, 262, 1284-1291.
- [8]. E. Martín del Campo, J. S. Valente, T. Pavón, R. Romero, A. Mantilla y R. Natividad. (2011). 4-chlorophenol oxidation photocatalyzed y a calcined Mg-Al-Zn layered double hydroxide in a concurrent downflow bubble column. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 50 (20), 11544-11552.
- [9]. Muciño, G.E.G., Romero, R., García-Orozco, I., Serrano, A.R., Jiménez, R.B., Natividad. (2016). R. Deactivation study of $\text{K}_2\text{O}/\text{NaX}$ and $\text{Na}_2\text{O}/\text{NaX}$ catalysts for biodiesel production. *Catalysis Today*, 271, 220-226.
- [10]. Muciño, G.G., Romero, R., Ramírez, A., Martínez, S.L., Baeza-Jiménez, R., Natividad, R. (2014). Biodiesel production from used cooking oil and sea sand as heterogeneous catalyst. *Fuel*, 138, 143-148.
- [11]. Peña, R., Romero, R., Martínez, S.L., Natividad, R., Ramírez, A. (2013). Characterization of KNO_3/NaX catalyst for sunflower oil transesterification. *Fuel*, 110, 63-69.
- [12]. Luz Martínez, S., Romero, R., López, J.C., Romero, A., Sánchez-Mendieta, V., Natividad, R. (2011). Preparation and characterization of CaO nanoparticles/

- NaX zeolite catalysts for the transesterification of sunflower oil. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50, (5) 2665-2670.
- [13]. Peña, R., Romero, R., Martínez, S.L., Ramos, M.J., Martínez, A., Natividad, R. (2008). Transesterification of castor oil: Effect of catalyst and co-solvent. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48 (3) 1186-1189.
- [14]. Ramos, M.J., Casas, A., Rodríguez, L., Romero, R., Pérez, A. (2008). Transesterification of sunflower oil over zeolites using different metal loading: A case of leaching and agglomeration studies. *Applied Catalysis A: Gen.*, 346 (1-2) 79-85.
- [15]. Valverde, J.L., Romero, A., Romero, R., García, P.B., Sánchez, M.L., Asencio, I. (2005). Preparation and characterization of Fe-PILCS. Influence of the synthesis parameters. *Clays and Clay Minerals*, 53 (6) 613-621.
- [16]. Dorado, F., Romero, R., Cañizares, P. (2002). Hydroisomerization of n-butane over Pd/HZSM-5 and Pd/H β with and without binder. *Applied Catalysis A: Gen.*, 236 (1-2), 235-243.
- [17]. D. A. Solís-Casados, L. Escobar-Alarcón, A. Infantes-Molina, T. Klimova, Lizbeth Serrato-García, Enrique Rodríguez-Castellón, Susana Hernández-López y Alejandro Dorazco-González. (2017). Synthesis and characterization of ag-modified v_2o_5 photocatalytic materials. *Journal of Chemistry*, ID 5849103, doi.ORG/10.1155/2017/5849103.
- [18]. D.A. Solís-Casados, L. Escobar-Alarcón, L.M. Gómez-Oliván, E. Haro-Poniatowski, T. Klimova. (2017). Photodegradation of pharmaceutical drugs using Sn-modified TiO $_2$ powders under visible light irradiation. *Fuel*, 198, 3-10.
- [19]. L. Escobar-Alarcón, D.A. Solís-Casados, F. González-Zavala, S. Romero, M. Fernandez y E. Haro-Poniatowski. (2017). Preparation of nanostructured Bi-modified TiO $_2$ thin films by crossed-beam laser ablation plasmas. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 792 012006, DOI: 10.1088/1742-6596/792/1/01200.
- [20]. D. A. Solís-Casados, L. Escobar-Alarcón, T. Klimova, E. Rodriguez-Castellón, J.A. Cecilia, C. Morales-Ramírez, C. (2016). Catalytic performance of CoMo/Al $_2$ O $_3$ -MgO-Li(x) formulations in DBT hydrodesulfurization. *Catalysis Today*, 271, 35-44.
- [21]. L. Escobar-Alarcón, D.A. Solís-Casados, M. Fernández y F. Valencia. (2013). Malachite green degradation in simulated wastewater using Ni $_x$ -TiO $_2$ thin films. *Fuel*, 110, 2013, 17-22.

La catálisis y fotocatálisis en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León

Javier Rivera de la Rosa*

RESUMEN: En esta contribución se describen las actividades de investigación, docencia y vinculación que se realizan en las áreas de catálisis y fotocatálisis en la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Se presentan los inicios de investigaciones en el área de catálisis y fotocatálisis en la FCQ de la UANL, que coincidió con la apertura de los posgrados de maestría y doctorado en ciencias con orientación en procesos sustentables, y la orientación en química analítica ambiental ambos en el Padrón Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México. Se cuenta con diferentes tipos de investigación en catálisis y fotocatálisis, tanto en la parte de síntesis y caracterización de nuevos catalizadores, estudios en diferentes tipos de reactores catalíticos para diferentes reacciones en aplicaciones ambientales y de biocombustibles. Las vinculaciones con grupos de catálisis con diferentes universidades de México y Estados Unidos de América, así como una doble titulación con la Universidad de Isla Baleares, en España. Se han dado servicios a la industria en área de catálisis y fotocatálisis y se tienen proyectos de colaboración con la plataforma solar de Almería, en España, por parte del grupo del Laboratorio de Fotocatálisis y Electroquímica Ambiental. En los posgrados relacionados con la investigación en catálisis se vislumbra un crecimiento a corto y mediano plazo en número de estudiantes del extranjero y productos académicos con colaboración internacional.

PALABRAS CLAVE: Catálisis, fotocatálisis, reactores continuos, vinculación internacional.

ABSTRACT: This work describes the research, academic and collaboration activities carried out in the areas of catalysis and photocatalysis at the Faculty of Chemistry (FCQ, Spanish acronym) of the Autonomous University of Nuevo Leon (UANL, Spanish acronym). It presents the beginnings of research in the area of catalysis and photocatalysis in the FCQ of the UANL, coincided with the opening of the postgraduate Master and Doctorate in Sciences with a focus on Sustainable Processes and the focus in Environmental Analytical Chemistry in the National Register of Postgraduates Programs of Quality (PNPC, Spanish acronym) of the National Council of Science and Technology (CONACYT, Spanish acronym) of Mexico. There are different types of researches in catalysis and photocatalysis; with the synthesis and characterization of new catalysts, and studies in different configurations of catalytic reactors for different reactions in environmental and biofuels applications. The collaboration network with catalysis groups are in different universities in Mexico and the United States of America, as well as a double degree with the University of Balearic Island, in Spain. Technologic services have been provided to the industry in

Recibido: 23 de enero de 2016. Aceptado: 17 de marzo de 2017.

*Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, Facultad de Ciencias Químicas, Ave. Universidad s/n, Cd. Universitaria, c.p. 64451, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Correspondencia: (javier.rivera@uanl.edu.mx).

El doctor Javier Rivera de la Rosa recibió su grado de Dottore in Ricerca in Ingegneria Chimica del Politecnico di Torino, Italia en el 2003. Es maestro en ciencias en ingeniería mecánica con especialidad en materiales por la UANL e ingeniero químico también por la UANL.

catalysis and photocatalysis and currently there is a project of collaboration with the solar platform of Almería in Spain. In the postgraduate studies of catalysis research shows a growth in the short and medium term in the number of students with academic products with international collaboration.

KEYWORDS: Catalysis, photocatalysis, continues reactors, international collaboration.

Introducción

La Facultad de Ciencias Químicas (FCQ) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) fue fundada en 1933, siendo su precedente la Escuela de Química y Farmacia en 1931, actualmente se ofrecen cuatro programas de licenciatura: químico farmacéutico biólogo, licenciado en química industrial, ingeniero químico, e, ingeniero industrial administrador. Todos los programas acreditados a nivel nacional por organismos reconocidos como el Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería Superior, A. C. (CACEI), Consejo Nacional de Enseñanza y del Ejercicio Profesional de las de Ciencias Químicas, A. C. (CONAECQ) y el Consejo Mexicano para la Acreditación de la Educación Farmacéutica, A. C. (COMAEF), también reconocidos por organismos extranjeros como The Royal Society of Chemistry y actualmente se ha sometido bajo la visita de evaluación los programas de ingeniería de parte del American Board of Engineering and Technology (ABET) de los Estados Unidos de América.

La oferta de estudios de posgrado en la FCQ de la UANL son: maestría en administración con seis orientaciones, maestría en ingeniería industrial con tres orientaciones, cinco maestrías en ciencias con diferentes orientaciones: en procesos sustentables, farmacia, química analítica ambiental, química de materiales, y, microbiología aplicada así como también cinco doctorados en ciencias con las mismas orientaciones anteriormente mencionadas; estos últimos diez programas se encuentran dentro el Padrón Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México, y muy recientemente se ofrece la especialidad en sustentabilidad de los procesos del petróleo.

La FCQ de la UANL cuenta actualmente con cerca de 4,500 estudiantes de pregrado y 500 de posgrado, así como también 156 profesores de tiempo completo de los cuales 68 pertenecen al Sistema Nacional de Investigadores. La FCQ cuenta con dos campus, uno ubicado en Ciudad Universitaria en el municipio de San Nicolás de los Garza y una División de Estudios Superiores (DES) en la colonia Treviño en el municipio de Monterrey. Dentro de sus instalaciones cuenta con cerca de 40 laboratorios de enseñanza y de investigación, además cuenta con una Subdirección de Servicios Tecnológicos donde se brindan diferente tipos de venta de servicios y productos a la industria, con Laboratorio de Análisis Clínico, Laboratorio de Microbiología, Laboratorio de Alimentos, Laboratorio de Pruebas e Investigación de Cerámica, Centro de Negocios y Educación Continua (CNYEN) y particularmente el Laboratorio de Servicios Profesionales, el cual cuenta con las siguientes acredi-

taciones: Aguas Residuales, AG-051-008/10, Físicoquímico, A-064-009/10, Residuos R-0150-50-015/10, y muy próximamente con la apertura del Laboratorio de Sustentabilidad de los Procesos del Petróleo. A través del CNYEN los profesores investigadores de tiempo completo de la FCQ han desarrollado proyectos de vinculación con la industria local y nacional. También se ofrecen cursos de educación continua con cursos cortos y diplomados en varios temas como calidad, artículos de cosmetología, seguridad industrial entre otros. Para la realización de las actividades se cuenta con un sistema de clasificación, recolección y confinamiento de residuos peligrosos y municipales producidos en todos sus laboratorios y actividades de toda la comunidad [1], cabe denotar que la FCQ de la UANL ha obtenido el certificado de Calidad Ambiental Nivel 1 de parte de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) los años 2012, 2014 y 2016. Esta evaluación se realizó durante una auditoría para el control de las cargas ambientales de agua, aire, suelo y subsuelo, residuos peligrosos, residuos no peligrosos, riesgos y administración ambientales. También es importante mencionar que los procedimientos académicos, tecnológicos y trámites administrativos están bajo la norma ISO 9001:2008.

Dentro de este entorno de docencia, servicios a la industria y gestión de los residuos peligrosos y no peligrosos, con procedimientos bajo un sistema de calidad, los investigadores de las áreas de catálisis y fotocatálisis de la FCQ de la UANL gestionan recursos externos, dirigen proyectos, realizan vinculación y varios de ellos son evaluadores en el PNPC del CONACYT, en los organismos nacionales mencionados y procuran la vinculación con el sector privado y académico nacional e internacional. Este trabajo describe los programas de posgrados donde se desempeñan investigaciones en catálisis y fotocatálisis, infraestructura disponible y vinculaciones de los investigadores actuales de la FCQ de la UANL, así como una visión a corto y mediano plazo.

Posgrados relacionados con catálisis y fotocatálisis

Los posgrados relacionados con catálisis y fotocatálisis en la FCQ de la UANL son maestría en ciencias con orientación en procesos sustentables, maestría en ciencias con orientación en química analítica ambiental, doctorado en ciencias con orientación en procesos sustentables, y, doctorado en ciencias con orientación en química analítica ambiental. Ambos programas en el PNPC del CONACYT con el nivel de consolidados y próximamente en el 2017 se aplicará para el nivel de internacional. Los Cuerpos Académicos organizados que principalmente realizan productos académicos y de vinculación dentro de estos posgrados son el de Cuerpo Académico de Ingeniería Química y el Cuerpo Académico de Evaluación y Tratamiento de Contaminantes Ambientales, ambos consolidados según el Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP). Desde el 2006 se han producidos en tiempo y forma varias tesis de maestría y doctorado en ciencias en ambas orientaciones, obteniendo reco-

nocimientos nacionales e internacionales como mejor tesis de ingeniería y tecnología de la UANL, premios de investigación en la áreas de ciencias, así como en ingeniería y tecnología de la UANL, premio de mejor tesis de maestría en catálisis de parte de la Academia de Catálisis A.C. (ACAT) de México, reconocimiento de Beca Kokes por parte de la North American Catalysis Society para asistir al North American Meeting. De las tesis producidas se han derivado presentaciones en congresos nacionales e internacionales tales como en el Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química (AMIDIQ), Congreso Mexicano de Catálisis (CMC), Congreso Mexicano de Química (CMQ), Congreso Internacional de la North American Catalysis Society, entre otros. También se ha publicado en varias revistas científicas indizadas de acuerdo con la lista del Science Citation Index Report como: *Applied Catalysis B. Environmental*, *Applied Catalysis A. General*, *The Chemical Engineering Journal*, *Journal of Hazardous Materials*, *Journal of Materials Science*, entre otras, los artículos a los que hacemos mención se encuentran en el listado de referencias.

Las Líneas de Generación y Aplicación del Conocimiento (LGAC) en las cuales se desarrollan los proyectos y los profesores investigadores colaboran entre sí son: Aplicación de métodos analíticos en el desarrollo de procesos para tratamiento de contaminantes en los posgrados con orientación en química analítica ambiental y la LGAC de procesos sustentables en los posgrados con orientación en procesos sustentables.

La maestría en ciencias y doctorado en ciencias con orientación en química analítica ambiental cuenta con un convenio de doble titulación con la Universidad de Islas Baleares (UIB) en España, actualmente han graduado a un doctor en ciencias, y se han realizado estancias de investigación de profesores y estudiantes del programa de la FCQ de la UANL en esa universidad de España.

Los proyectos relacionados con catálisis y fotocatalisis de los cuatro programas en ambas orientaciones se pueden describir en los tres rubros de síntesis, caracterización y aplicaciones.

Síntesis

Síntesis de óxidos metálicos como dióxido de titanio, alúmina y materiales micro y mesoporosos como la SBA-15 y zeolitas como soportes principalmente (aunque tiene contribución en la actividad catalítica y fotocatalítica) que pueden ser dopados con metales de transición como Fe, Zn, La, Zr, Mn, Cu, entre otros, y por lo tanto se ven modificadas sus propiedades texturales (de los soportes) y a su vez en su actividad catalítica. También se está experimentando actualmente con dopaje con aniones como el fluoruro y nitrógeno. Otra modalidad es utilizar los soportes depositando nanopartículas de metales como Pd, Pt y Fe elemental a bajas concentraciones y a su vez buscar nanopartículas de aleaciones de la combinación de Pd-Fe y Pt-Fe los cuales dan como resultado nuevos sitios activos. Generalmente los catalizadores

(soportes dopado o puros) han sido sintetizados por técnicas como sol-gel o coprecipitación, las cuales los profesores investigadores en catálisis y fotocatalisis tienen bien dominadas, y cuentan con una amplia experiencia para proponer modificaciones a la técnica (sobre todo sol-gel) y provocar nuevos e interesantes sitios activos. También se han utilizado soportes comerciales (comprados de distribuidor comercial) como alúmina y zeolitas. Actualmente se están sintetizando zeolitas de tamaño nanométrico, como soportes.

Caracterización

Los catalizadores y fotocatalizadores sintetizados para los proyectos de investigación en los laboratorios de la FCQ de la UANL, son caracterizados en fases intermedias de preparación (para control y conocimiento del método), frescos preparados e inclusive ya usados en reacción. Las técnicas para la caracterización son múltiples entre las cuales se pueden mencionar: análisis térmico diferencial, gravimetría y calorimetría diferencial de barrido, espectrometría de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR), espectrometría de UV y visible para sólidos y líquidos, difracción de rayos X de polvo, fisiorción de nitrógeno, microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés), análisis elemental por diferentes técnicas analíticas. En otros laboratorios de la UANL también se tiene acceso a técnicas como microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM por sus siglas en inglés), espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS por sus siglas en inglés). Asimismo, se cuenta con caracterización especializada resonancia magnética nuclear (NMR, por sus siglas en inglés) para sólidos con colaboración de las Universidades de The City University of New York y Clemson University en Estados Unidos de América.

Aplicaciones (reactores)

Las aplicaciones de los catalizadores y fotocatalizadores sintetizados son del tipo ambiental, industrial y producción de biocombustibles. Las reacciones son en estado líquido y gaseoso, en estado continuo o reactor tipo carga y descarga (*batch*). Se han construido diferentes tipos de reactores continuos para estudiar la cinética y efectos de transferencia de masa para las reacciones de interés. Los reactores diseñados, construidos y usados han sido de tipo cama empacada, monolitos, placas paralelas, reactor anular y también bifásico de las fases fluidas. Los reactores cuentan con medidores de presión y temperatura y los datos son recolectados por interfases en equipo de cómputo. El análisis de concentración de los reactivos y productos de reacción son a través de técnicas como cromatografía de gases (GC), cromatografía de alta eficiencia de líquido (HPLC, por sus siglas en inglés) y UV-vis de soluciones líquidas. Se determinan cinéticas y se analizan y los efectos de transferencia de masa son evaluados.

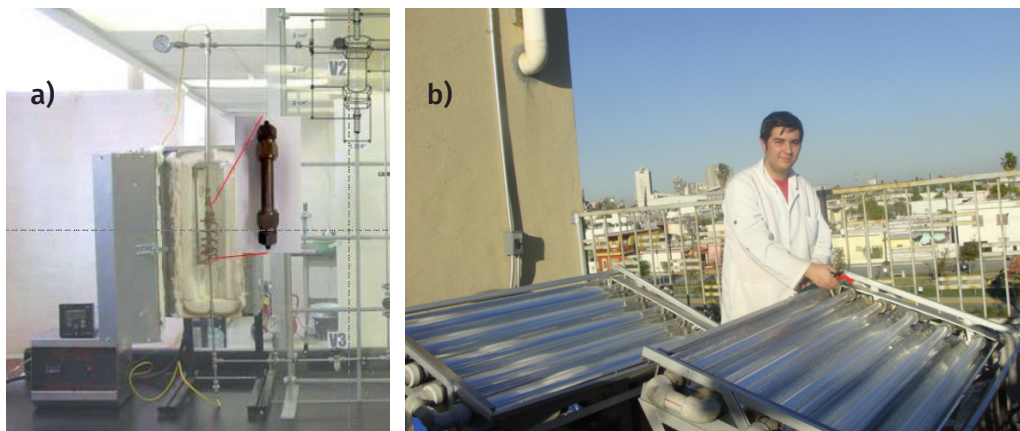


FIGURA1. a) Reactor continuo de cama empacada con medidores de presión y temperatura; b) reactor solar de tipo captador parabólico compuesto (CPC).

Infraestructura

En la FCQ de la UANL se han adquirido diferentes equipos para la investigación por diferentes fuentes de financiamiento, por convocatorias del CONACYT, PRODEP, proyectos con la industria y otras fuentes externas. A continuación se enlistan algunos equipos convenientes para la investigación en catálisis y fotocatalisis:

- Equipo de fisisorción de nitrógeno Autosorb-1 (Quantachrome Co.).
- Cromatógrafos de gases de diferentes modelos 5890, 6890 y 7890 A de Agilent y con diferentes detectores como FID y TCD y de masas.
- Cromatógrafos de líquidos de alta eficiencia (HPLC) con diferentes detectores como IR, arreglos de diodos y masas.
- Analizador elemental por espectrometría de plasma por microondas Agilent 4200.
- Difractómetro de rayos-X, modelo D2 Phaser, Bruker.
- Espectrómetro UV-vis, modelo 300, Nicolet con accesorio de reflectancia difusa.
- Espectrómetro FTIR, modelo 200-X Interspec con accesorio de reflectancia atenuada.
- Calorímetro de barrido diferencial DSC, modelo DSC-50, Shimadzu.
- Analizador térmico diferencial DTA, modelo DTA-50, Shimadzu.
- Viscosímetro, modelo MV-3000, Cambridge Instruments.
- Densímetro, Anton Par.
- Microscopio de barrido electrónico SEM, modelo Nescope 6000, JEOL.
- Microscopio estereoscópico, modelo MV-439, National Instruments.

- Rotavapor, modelo RE-800 Yamato.
- Analizador de carbono orgánico total Shimadzu.

En la figura 2 se muestran los últimos equipos adquiridos para análisis de muestras, instalados en el Laboratorio de Sustentabilidad de Procesos del Petróleo (LSPP).

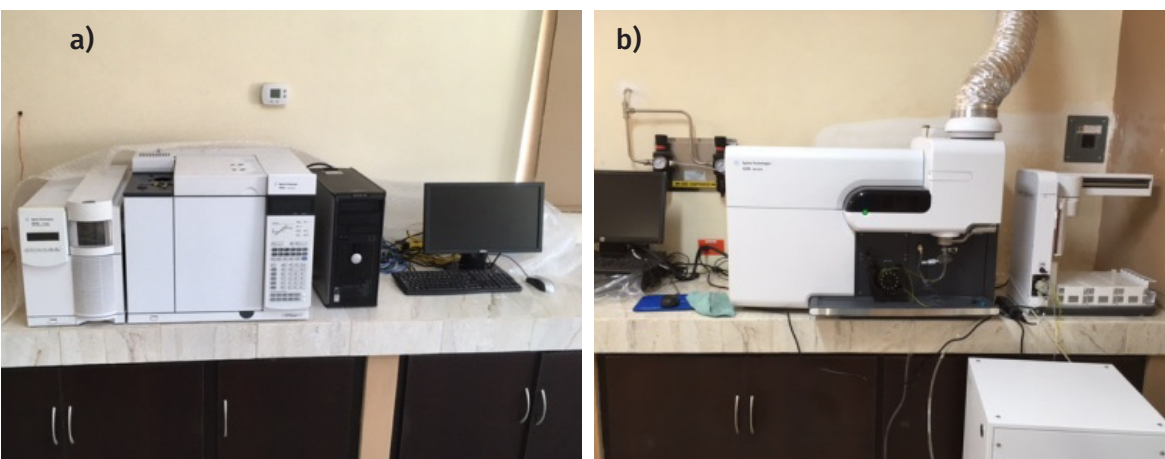
Vinculación

Los investigadores de la FCQ de la UANL que realizan investigación en catálisis y fotocatalisis han proporcionado servicios tecnológicos a la industria privada como a INNO-BA Centro Lavín para el Desarrollo de Innovación y Transferencia Tecnológica, del Estado de Morelos así como con la Juguera Allende y la empresa Hydrocontrol. También los estudiantes de posgrado con proyectos en catálisis y fotocatalisis han realizado estancias en otras universidades nacionales como la Universidad Autónoma Metropolitana en Iztapalapa, el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y en el extranjero como en The City University of New York, University of Texas en San Antonio, Clemson University, todos con productos académicos, tesis y artículos en revistas indizadas de alto impacto.

Como se ya se mencionó antes, se tiene una vinculación consolidada con la doble titulación a nivel de posgrado con la Universidad de las Islas Baleares, en España.

Actualmente hay una colaboración internacional con la Plataforma Solar en Almería (PSA), España, de la cual se han generado publicaciones en con-

FIGURA 2. a) Cromatógrafo de gases masas Agilent 7890A instalado en LSPP, y, b) analizador elemental por espectrometría de plasma por microondas Agilent 4200 instalado en LSPP.



junto y asesorías de tesis tanto de la UANL como de la Universidad de Almería con la cual está vinculada la PSA.

Principales logros en catálisis y fotocatálisis

Los principales logros de la FCQ de la UANL en catálisis y fotocatálisis se pueden resumir en cuatro puntos:

1. Formación de cuerpos académicos consolidados en la investigación en catálisis y fotocatálisis. Debido al número de estudiantes locales, nacionales y extranjeros (actualmente de Colombia y Venezuela), a los productos de tesis en tiempo y forma y los artículos en revistas de alto impacto del área de catálisis. Vinculaciones efectivas y estancias de los estudiantes de los posgrados mencionados en diferentes institutos de investigación y universidades nacionales e internacionales.
2. Disponibilidad de infraestructura que se ha obtenido a través de fondos de convocatorias del CONACYT y con proyectos con la industria. Los estudiantes de posgrado y licenciatura que desean hacer su tesis en los campos de catálisis y fotocatálisis encuentran en la FCQ y en toda la UANL una completa línea de diferentes técnicas experimentales de medición de diferentes propiedades, y las vinculaciones nacionales e internacionales permite tener acceso a equipo especializado, la espectrometría de NMR en estado sólido con polarización cruzada y resonancia magnética nuclear con giro al ángulo mágico (*magic angle spinning*), permite obtener artículos de alta calidad.
3. La doble titulación que pueden aplicar los estudiantes de posgrado de la maestría en ciencias y doctorado en ciencias con orientación en química analítica ambiental con UIB en España, es un logro ejemplar que se está replicando en otras orientaciones de otros posgrados de la FCQ de la UANL.
4. El impacto nacional e internacional de los Cuerpos Académicos Consolidados de la FCQ de la UANL a través de sus productos académicos y de vinculación les da la pertinencia de organizar el próximo Congreso Mexicano de Catálisis XV Nacional y VI Internacional [7].

Visión al futuro de la investigación en catálisis y fotocatálisis

La investigación en catálisis y fotocatálisis en la FCQ de la UANL tiene como perspectivas el crecimiento en todos los rubros; conocimiento, productos de alto impacto a nivel internacional, consolidar las vinculaciones actuales con las universidades nacionales e internacionales, replicar el modelo de doble titulación en las demás orientaciones de los posgrados en ciencias donde se

desarrolla investigación en catálisis y fotocatalisis. Lograr otros convenios de colaboración y doble titulación con otras universidades en el extranjero.

La investigación de catálisis y fotocatalisis en la FCQ de la UANL desea crear una escuela en este ramo de la investigación a través de sus egresados de doctorado para luego ir a otras instituciones nacionales o internacionales a replicar el modelo aprendido en metodología de la investigación en catálisis y fotocatalisis.

La vinculación con el sector privado y público tiene un amplio rango de oportunidad y esto se logrará con los proyectos en conjunto con estos organismos.

Los posgrados de la FCQ de la UANL relacionados con catálisis y fotocatalisis serán una referencia internacional de calidad e impacto en la investigación en este ramo, y por lo tanto estudiantes nacionales y extranjeros desearán realizar estancias o estudios completos en ellos. Más profesores y posdoctorados erigirán a la FCQ de la UANL para realizar estancias en el ramo de investigación de catálisis y fotocatalisis.

Sitios de interés

- Página institucional:
<<http://www.fcq.uanl.mx/>>

Referencias

- [1]. E. R. Lara, J. R. de la Rosa, A. I. R. Castillo, F. J. Cerino-Córdova, U. J. L. Chuken, S. S. F. Delgadillo, P. Rivas-García. (2017). A comprehensive hazardous waste management program in a Chemistry School at a Mexican university. *Journal of Cleaner Production*, vol 142, 1486, 1491.
- [2]. Daniela Xulú Martínez-Vargas, Javier Rivera de la Rosa, Carlos J. Lucio-Ortiz, Aracely Hernández Ramírez, Gerardo A. Flores-Escamilla, Carlos D. García. (2015). Photocatalytic degradation of trichloroethylene in a continuous annular reactor using Cu-doped TiO₂ catalysts by sol-gel synthesis. *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 179, 249-261.
- [3]. Daniela X. Martínez Vargas, Javier Rivera de La Rosa, Saba Arif Iyoob, Carlos J. Lucio Ortiz, Felipe J. Cerino Córdova, Carlos D. García. (2015). Phenol oxidation by air using a Co (II) Salen complex catalyst supported on nanoporous materials: Synthesis, characterization and kinetic analysis. *Applied catalysis A*, vol. 179, 249-261.
- [4]. M. Jiménez-Tototzintle, I. Oller, A. Hernández-Ramírez, M. I. Maldonado. (2015). Remediation of agro-food industry effluents by biotreatment combined with supported TiO₂/H₂O₂ solar photocatalysis. *The Chemical Engineering Journal*, vol. 273, 205-213.
- [5]. Benjamín Garza-Campos, Enric Brillas, Aracely Hernández-Ramírez, Edgar J. Ruiz-Ruiz. (2016). Salicylic acid degradation by advanced oxidation processes.

- Coupling of solar photoelectro-Fenton and solar heterogeneous photocatalysis. *Journal of hazardous materials*, vol. 319, 34-42.
- [6]. Iliana Medina-Ramírez, Jingbo Louise Liu, Araceli Hernández-Ramírez, Miguel A. Gracia-Pinilla. (2014). Synthesis, characterization, photocatalytic evaluation, and toxicity studies of $\text{TiO}_2\text{-Fe}_3\text{+}$ nanocatalyst. *Journal of Materials Science*, vol. 49, 5309-5323.
- [7]. XV Congreso Mexicano de Catálisis y VI Internacional. (2017). <http://eventos.uanl.mx/cmc_2017/index.html>.

Investigación en catálisis en la Universidad Michoacana

José Luis Rico Cerda*

RESUMEN: En este trabajo se hace una breve reseña de la investigación y actividades relacionadas con la catálisis llevadas a cabo en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Se mencionan los proyectos y las tareas de investigación, la infraestructura disponible, así como las colaboraciones con diferentes instituciones. Finalmente, se mencionan los principales logros.

PALABRAS CLAVE: Catálisis, proyectos de investigación, infraestructura.

Abstract: A brief review of the research activities on catalysis at the Department of Chemical Engineering of the University of Michoacan is herein described. The approved research projects, the available infrastructure in the laboratory and the collaboration with other institutions are also mentioned. The main achievements are finally commented.

KEYWORDS: Catalysis, research projects, infrastructure.

Introducción

Las actividades de investigación en el área de catálisis comienzan en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) con la incorporación del autor de esta reseña a la Facultad de Ingeniería Química (FIQ), perteneciente a esta institución, en 1993. Sin embargo, y debido a las dificultades encontradas en todo comienzo, fue hasta el año de 1996 que se realizó el primer trabajo de tesis relacionado con catálisis. Los primeros temas de investigación fueron sobre la síntesis de materiales y su caracterización. Cabe mencionar que gracias a los apoyos recibidos del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH, nuestras actividades de investigación fueron posibles y continúan siendo apoyadas en la actualidad. Esto se debe a que dicho instituto cuenta con infraestructura muy importante para nuestros fines, como son, por ejemplo, los equipos de microscopía electrónica, difracción de rayos X, espectroscopía de infrarrojo, entre otros. Asimismo, del 22 al 24 de noviembre de 1998, conjuntamente con la Academia de Catálisis A.C., organizamos por primera vez en nuestra institución, el IV Encuentro Nacional de Catálisis Heterogénea, lo cual vino a robustecer el desarrollo de esta área de investigación en la región occidente de nuestro país. Actualmente, somos

Recibido: 23 de enero de 2017. Aceptado: 17 de marzo de 2017.

*División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. Gral. Francisco J. Múgica S/N, Ciudad Universitaria, 58030, Morelia, Mich., México. Correspondencia: (jlrco@umich.mx).



FIGURA 1. Edificio de posgrado de la FIQ de la UMSNH.

cinco profesores los que realizamos investigación en catálisis, y, con excepción de un profesor, todos nos formamos en el Laboratorio de Catálisis de la FIQ de la UMSNH: Dr. R. Huirache Acuña, Dr. J. Espino Valencia, Dr. M. Arroyo Albiter y el Dr. H. González Rodríguez. Además, hasta la fecha, 111 estudiantes han realizado su tesis y obtenido su grado en temas relacionados con la catálisis en nuestra institución.

Líneas de investigación y perspectivas de desarrollo

Las líneas de investigación relacionadas con la catálisis en las que trabajamos son: fuentes alternas de energía, hidrotratamiento, degradación de contaminantes por medio de la fotocatálisis, reformación del metano tradicional y en seco, síntesis del amoníaco, uso de materiales naturales y de desecho como catalizadores, hidrogenaciones e isomerizaciones. Las actividades incluyen síntesis, caracterización y prueba de catalizadores en reacciones químicas, las cuales se llevan a cabo en diferentes tipos de reactores. Los tipos de materiales catalíticos usados son: metales, óxidos, sulfuros, fosfuros, nitruros y carburos metálicos. Es de mencionarse que el potencial de aplicación de estos materiales es enorme, ya sea en el campo de la catálisis, como en el área de nuevos materiales nanométricos de morfologías diferentes.

Continuaremos la investigación sobre nuevos materiales catalíticos y su aplicación en diferentes reacciones químicas. Prevemos que la investigación en nuestro laboratorio para los próximos años se concentrará más en la sín-

tesis de biocombustibles y problemas de contaminación del aire y agua. Seguiremos con el desarrollo de catalizadores para la obtención de hidrógeno, para la síntesis de 2,5-dimetilfurano como biocombustible obtenido a partir de la biomasa y en la obtención del biodiesel a partir de diferentes materias primas. Sobre problemas de contaminación del agua seguiremos con el desarrollo de fotocatalizadores, además, probaremos nuevas rutas combinadas fotocatalíticas-enzimáticas, para lo cual se colabora actualmente con el Dr. J. M. Sánchez Yáñez. También continuaremos con la síntesis de nanomateriales para su aplicación en diferentes campos. Por caso, actualmente desarrollamos materiales quitosano-óxido de hierro, interactuando con Dra. N. Flores Ramírez y el Dr. S. R. Vázquez García, en la obtención de nuevos materiales para reemplazo de hueso, por ejemplo, con el compuesto Ti_6Al_4V , investigación a cargo del Dr. L. R. Olmos Navarrete. Contamos además con la colaboración del Dr. P. Navarro Santos, quien realiza cálculos sobre química teórica y computacional. Además, seguiremos colaborando con expertos de instituciones mencionadas en el apartado sobre colaboración, lo cual fortalecerá aún más el desarrollo de esta área de investigación en nuestra institución.

Proyectos

Los proyectos apoyados hasta la fecha son:

- Catalizadores de Pt para la hidrogenación isomerativa de trans-2-butenol.
- Hidrodesoxigenación del fenol con catalizadores trimetálicos.
- Desarrollo de catalizadores de hidrodesulfuración de Co(Ni)MoW soportados en sílices mesoporosas (HMS y SBA-16) modificadas con aluminio: efecto del soporte y del promotor.
- Desarrollo de catalizadores de hidrodesulfuración de Co(Ni)MoW soportados en sílices mesoporosas (HMS y SBA-16) modificadas con aluminio.
- Desarrollo de catalizadores trimetálicos de hidrodesulfurización soportados en sílices mesoporosas modificadas con Titanio.
- Síntesis de nanopartículas de sulfuros bimetálicos soportadas sobre nanotubos de carbono y su aplicación en hidrodesulfuración.
- Síntesis hidrotérmica de nanopartículas de sulfuros metálicos soportadas sobre nanotubos de carbono y su aplicación en hidrodesulfuración.
- Desarrollo de catalizadores a base de sulfuros y fosfuros de metales de transición y su aplicación en hidrodesulfuración.
- Caracterización de materiales catalíticos superácidos a base de titania.
- Reformación del metano en seco.
- Titania sulfatada en la reacción de isomerización del n-butano.
- Isomerización de n-butano en sólidos de gran acidez: efecto de las condiciones de reacción.

- Nanomateriales de MoS_2 como catalizadores.
- Conversión heterogénea de aceite a biodiesel mediante un proceso consecutivo de esterificación ácida/transesterificación básica.
- Síntesis y caracterización de titanía mesoestructurada por el método EISA y su aplicación fotocatalítica: influencia del método de secado y precursor de titanio.
- Modificación de derivados de resina de pino para la elaboración de productos de especialidad.
- Biodiesel como fuente alterna de energía.
- Síntesis de biodiesel en presencia de catalizadores sólidos.
- Síntesis de biodiesel a partir de aceite de higuera y en presencia de catalizadores sólidos.
- Nitruro de CoMo modificado con paladio.
- Incorporación del níquel en la estructura del nitruro de CoMo.
- Síntesis de compuestos trimetálicos básicos Ni-W-Mo por el método hidrotérmico para hidrodesulfuración.
- Catalizadores trimetálicos NiWMo soportados y probados en reacciones de hidrotratamiento (hidrodesulfuración e hidrodesnitrificación): modificación superficial del soporte óxido mixto aluminio-titanio con magnesio.
- Procesos de oxidación avanzados.
- Influencia del templante en la obtención de titanía mesoestructurada y actividad fotocatalítica.

De estos proyectos, 21 (84 %) fueron apoyados y financiados por la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH; 2 proyectos (8 %) por el CONACYT; 1 proyecto por la SEP-PROMEP, y otro por el COECYT, Michoacán.

Colaboraciones

A continuación se enlistan las universidades o instituciones con las que se ha tenido, y se tiene colaboración en actividades de investigación:

Nacionales

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Querétaro.
Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí.
Instituto Tecnológico de Morelia.
Universidad Autónoma del Estado de México.
Universidad Autónoma de Querétaro.
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
Universidad Autónoma de México: Centro de Nanociencias y Nanotec-

nología; Facultad de Química; Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada.

Universidad Autónoma de Sinaloa.

Universidad de Guanajuato.

Extranjeras

Catalysis Research Center, Hokkaido University, Japón.

Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich, Suiza.

Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Zaragoza, España.

Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, Madrid, España.

Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon, Francia.

School of Chemistry, University of Glasgow, Scotland, Reino Unido.

Slovenská Vysoká Škola Technická vo Bratislave, Eslovaquia.

University of California Riverside, USA.

University of Liverpool, Reino Unido.

Infraestructura

La infraestructura con la que contamos es la siguiente: equipos para la reducción, oxidación y sulfuración; sistema para deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés); reactor para alta presión y temperatura; reactor tubular continuo; dos cromatógrafos de gases; sistema de adsorción acoplado a un equipo de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR, por sus siglas en inglés); equipo para la determinación de áreas superficiales; equipo de oxidación-reducción; reactores tipo batch para alta presión y temperatura; equipo de análisis térmico simultáneo (TGA-DSC, por sus siglas en inglés) acoplado a espectrómetro de masas; equipo de ultrasonido para reacciones químicas.

FIGURA 2. Sistemas de adsorción para medición de áreas superficiales y equipo de reacción para alta presión y temperatura.



Además de la infraestructura antes mencionada, se cuenta con el siguiente equipo de uso común dentro de la UMSNH: equipo de difracción de rayos X; microscopio electrónico de transmisión; microscopio electrónico de barrido; espectrómetro de infrarrojos; absorción atómica; resonancia magnética nuclear para el hidrógeno (^1H RMN) y equipo de microondas para preparación de materiales.

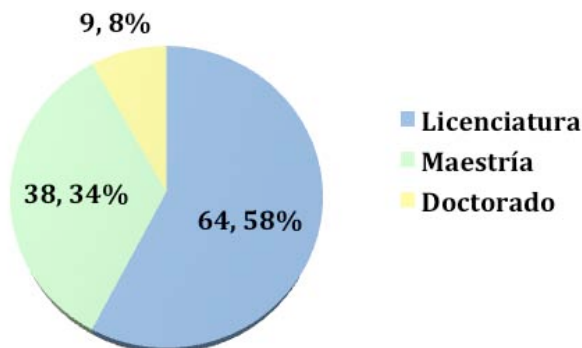
Formación de recursos humanos

El número total de estudiantes que han realizado su trabajo de grado en el área de la catálisis en nuestra institución, bajo la supervisión de los profesores que realizamos investigación en este campo es de 111 hasta la fecha. De éstos 11 fueron de doctorado, 44 de maestría y el resto de licenciatura. La gráfica siguiente muestra los porcentajes de esta distribución.

Logros principales

Son varios los logros relacionados con el área de la catálisis en nuestra Institución. La infraestructura con la que cuentan nuestros laboratorios de investigación es un éxito importante, se ha venido adquiriendo durante más de 20 años. Pero lo más sobresaliente, es la formación de jóvenes especialistas con diferentes grados académico preparados en esta área. Estos egresados se han incorporado a la vida laboral, o fomentan la investigación y educación en varias instituciones del país. En la actualidad, la catálisis es un área terminal de la maestría y de doctorado que ofrece el posgrado de la FIQ de la UMSNH, cuyos programas están acreditados en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT. Además de las publicaciones nacionales e internacionales en esta área de estudio, participamos frecuentemente en eventos especializados en nuestro país y en el extranjero.

FIGURA 3. Distribución de estudiantes que han terminado su grado, en problemas relacionados con la catálisis en nuestra institución.



La catálisis en la Universidad Veracruzana

María C. Barrera Domínguez,* Carolina Solís Maldonado,**
Raúl Alejandro Luna Sánchez,* Benoit Auguste Roger F.,**
Sara Núñez Correa***

RESUMEN: Este trabajo es una descripción de las actividades de investigación y docencia realizadas en los laboratorios multidisciplinarios de la Universidad Veracruzana (UV) relacionadas con catálisis y nanomateriales diseñados para este propósito entre otros. En primera instancia se presenta una reseña de la UV desde su creación, así como la misión y visión de esta Institución. Se describen las líneas de investigación, desarrollo y docencia relacionadas con las nanociencias, el trabajo de académicos involucrados con dicho laboratorio en sus diferentes campos de trabajo. Además, se reportan las colaboraciones y proyectos que se llevan a cabo, la infraestructura y los equipos disponibles, así como las actividades de docencia y formación de recursos humanos que se realizan en colaboración con varios cuerpos académicos. Finalmente, se describen los principales logros que se han alcanzado, las áreas de oportunidad y perspectivas de crecimiento que éstos vislumbran a corto y mediano plazo.

PALABRAS CLAVE: Líneas de investigación, proyectos de investigación, catálisis, Universidad Veracruzana.

ABSTRACT: In this paper, the research and teaching activities carried out in the different multidisciplinary laboratories at Universidad Veracruzana (UV) that are focused on the fields of catalysis and nanomaterials are described. Firstly, we provide a brief overview of the UV history since its foundation, including its mission and vision. Then, main lines of research, development and teaching, all of them related to nanosciences, are mentioned. Also, the most important works of various researchers investigating in several fields in the aforementioned laboratory are cited. In addition, projects and collaborations with other research groups, available infrastructure and equipment, and teaching and thesis projects carried out by students are included as well. Finally, some of the main achievements of the involved groups, areas of opportunity and perspectives for the future are presented.

KEYWORDS: Research lines, research projects, catalysis, Universidad Veracruzana.

Introducción

La Universidad Veracruzana inició su existencia formal el 11 de septiembre de 1944. A sus 72 años de creación se ha convertido en la principal institu-

Recibido: 23 de enero de 2017. Aceptado: 26 de abril de 2017.

* Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas (UV-FCQ), Región Coatzacoalcos-Minatitlán, Av. Universidad Veracruzana Km. 7.5 Col. Santa Isabel, C.P. 96535, Coatzacoalcos, Veracruz, Tel.: 01 (921)2115700. Correspondencia: (cobarrera@uv.mx).

** Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas. Av. Venustiano Carranza S/N, Col. Revolución, C.P. 93390, Poza Rica, Veracruz, México. Tel: 01(782)8227363.

Correspondencia: (casolis@uv.mx).

*** UV-FCQ, Región Coatzacoalcos-Minatitlán.



FIGURA 1. Vice Rectoría, Región Poza Rica- Tuxpan.

ción de educación superior pública y autónoma en el estado de Veracruz, con funciones de docencia, investigación, difusión de la cultura y extensión de los servicios.

Los programas de las entidades académicas dedicadas a la investigación se desarrollan en 24 institutos, 18 centros, 2 laboratorios de alta tecnología, el Museo de Antropología y en diversas facultades donde, cada vez más, la investigación se incorpora como el eje de la docencia.

Asimismo, la UV ofrece 74 programas educativos de posgrado, 19 doctorados, 46 maestrías, 3 especialidades médicas, y 6 especializaciones, todas reconocidas por el Padrón Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Entre los programas de posgrado, se puede resaltar el doctorado en ingeniería, la maestría en ciencias en micro y nanosistemas, maestría en ingeniería aplicada, maestría en química biorgánica, maestría en gestión ambiental para la sustentabilidad, maestría en ciencias del ambiente, y la especialización en gestión e impacto ambiental [3], que involucra la catálisis como parte de la solución en algunos de los proyectos de investigación desarrollados por parte de los estudiantes. La institución cuenta con 6,025 académicos (22% doctorado, 37% maestría, 8% especialidad y 33% licenciatura), 33% son Profesores de Tiempo Completo (PTC). Alrededor del 30 % de los profesores realizan proyectos de investigación mediante diversos programas: servicio social, becas trabajo, becarios del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), becarios de distintos proyectos CONACYT, Verano de la Investigación Científica, Verano de la Academia Mexicana de Ciencias y alumnos participantes en otras becas. Esta actividad permite incorporar a los alumnos en los proyectos de investigación con la guía de los

especialistas de las diferentes áreas, a través de tesis de licenciatura, maestría, doctorado y especialidad.

Cuerpos Académicos y líneas de generación y aplicación de conocimiento

La investigación en la Universidad Veracruzana, además de desarrollarse en los centros de investigación, también se deriva de los trabajos de tesis de nivel licenciatura y posgrado. Los profesores que realizan actividades de investigación, fortalecen la docencia; asimismo, participan en Cuerpos Académicos (CA) que cultivan diversas líneas de generación y aplicación del conocimiento (LGAC) con impacto a los programas educativos de licenciatura y de posgrado. La UV cuenta con 223 CA que cultivan 393 LGAC; de estos, 10 CA y 14 LGAC realizan trabajos donde la catálisis juega un papel muy importante.

1. **CA Físicoquímica de Procesos:** cultiva dos LGAC: a) ingeniería de reacciones químicas, que tiene como actividades: simulación de procesos, formulación y caracterización de materiales catalíticos como con aplicaciones ambientales y energéticas, aplicadas a la remediación ambiental, ahorro energético y producción de combustibles limpios. Fotocatálisis y electrocatálisis. Síntesis de nanomateriales para su uso en la oxidación avanzada aplicando el reactivo Fenton. Modelado de reactores químicos y electroquímicos con la finalidad de conocer el comportamiento de éstos en la síntesis de materiales poliméricos obtenidos por emulsión radicalica viviente. b) Procesos de superficie: encapsulación y liberación de sustancias químicas en la búsqueda de su aplicación en la liberación de fármacos, transporte de genes correlacionando la estructura y propiedades fisicoquímicas.
2. **CA Ingeniería, Procesos y Sustentabilidad:** cultiva dos LGAC: a) procesos y sustentabilidad: desarrollo y aplicación de tecnologías de vanguardia enfocadas a la prevención y remediación ambiental. Elementos asociados a mejorar de la productividad y competitividad de una industria química más limpia y sustentable que permita coadyuvar con la sociedad a transitar hacia la conservación de la biodiversidad y estilos de vida empáticos con el ambiente. Análisis de la cantidad de energía útil que se puede obtener de un sistema y de los elementos económicos asociados, promoviendo, con lo anterior, procesos con menor demanda de energía para realizar la misma tarea. b) Ingeniería y materiales: síntesis, caracterización y aplicación de materiales avanzados, incluyendo la simulación y modelado, en diversas ramas de la ingeniería. Desarrollo de sistemas catalíticos no agresivos al medio ambiente y capaces de alcanzar altas conversiones hacia productos deseados en el área de la petroquímica. Estudio de sistemas y mecanismos en diferentes condiciones operativas,

así como el diseño y caracterización de nuevos materiales con aplicación a la prevención y remediación ambiental.

3. **CA Ciencias e Ingeniería Aplicada:** cultiva tres LGAC: a) catálisis y fotocatalisis: aborda estudios sobre síntesis, caracterización de catalizadores, así como la evaluación de su actividad catalítica. Modelado cinético de los sistemas reaccionantes estudiados, así como efecto de los fenómenos de transporte. b) Tratamientos de aguas y productos naturales: tratamiento de aguas aplicando procesos avanzados de oxidación. c) Materiales y corrosión: síntesis de materiales poliméricos y biopolímeros. Estudios de corrosión sobre materiales metálicos.
4. **CA Ingeniería de los procesos químicos y biológicos:** cultiva la LGAC de desarrollo y caracterización de productos que tiene como actividad realizar investigación sobre el desarrollo y caracterización de productos químicos y biológicos a través de estrategias biotecnológicas y/o fisicoquímicas.
5. **CA Ingeniería de Procesos y Desarrollo Sustentable:** cultiva la LGAC en ingeniería de procesos industriales de separación-reacción y desarrollo de tecnologías limpias, que enfoca sus trabajos a temas como producción de biocombustibles a partir de biomasa.
6. **CA Ingeniería, Procesos y Gestión Ambiental:** cultiva la LGAC en ingeniería, procesos en el desarrollo sustentable, que tiene como actividad el desarrollar o mejorar los procesos, o atender problemáticas de la región.
7. **CA Ingeniería de los procesos químicos y biológicos:** cultiva la LGAC en desarrollo y caracterización de productos, que tiene como objetivo correlacionar las características fisicoquímicas con su actividad.
8. **CA Química de Productos con Actividad Biológica:** cultiva la LGAC en química de productos con actividad biológica.
9. **CA Estudio Integral de Ingeniería Aplicada:** cultiva la LGAC sobre análisis integral y control de procesos industriales y de ingeniería, en la cual se realiza el trabajo de manera multidisciplinaria.
10. **CA Gestión y Control de la Contaminación Ambiental:** cultiva la LGAC en bioprocesos de tratamiento de aguas residuales y control de la contaminación de suelos, donde los procesos avanzados de oxidación también tienen un papel importante.

Cabe señalar, que también se colabora en la dirección de tesis de posgrado con otras instituciones de educación superior, como son: la Universidad Autónoma de Nuevo León, Universidad Autónoma de Coahuila, Universidad Autónoma Metropolitana, Universidad Autónoma de Baja California, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, e Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

Infraestructura

Para lograr el desarrollo de la formación integral de los estudiantes, las facultades de cada región cuentan con infraestructura que les permite realizar proyectos relacionados con la catálisis, se tiene disponible para las labores de investigación los laboratorios multidisciplinarios de investigación, los cuales cuentan con diversos equipos de caracterización fisicoquímica de materiales, además de otros laboratorios de apoyo como son los de ciencia básica.

Entre los equipos para realizar caracterizaciones se pueden resaltar: calorímetro diferencial de barrido, espectrofotómetro UV-vis, espectrofotómetro de espectrómetro infrarrojo, centrifuga refrigerada, analizador termogravimétrico, potenciostato-galvanostato, cromatógrafo de alta resolución de líquidos (HPLC), cromatógrafo de gases (GC), analizador CHN/OS, espectrómetro de absorción atómica, equipo de meteorología, microscopios, balanzas analíticas, autoclaves, viscosímetros, potenciómetros, hornos de convención, centrifuga, rotavapor, así como equipo de cómputo, proyectores y pantallas planas.

Por otro lado, con fin de ofertar estudios de posgrados y crear espacios para el desarrollo de investigación se creó el Instituto de Ingeniería, ubicado en la región de Veracruz, cuyo fin es atender problemas regionales. La investigación que aquí se desarrolla se centra en las áreas de las ingenierías ambiental, de estructuras, eléctrica, hidráulica, mecánica, ciencias de la computación y telecomunicaciones [12].

En esta misma línea, la Universidad Veracruzana tiene la unidad de Servicios de Apoyo en Resolución Analítica (SARA), la cual es una dependencia

FIGURA 2. Equipo de laboratorio, Región Coatzacoalcos-Minatitlán.





FIGURA 3. Equipo de laboratorio, Región Poza Rica-Tuxpan.

de la Dirección General de Investigaciones y fue creada mediante la participación activa de un grupo de investigadores de la UV, con el fin de ofrecer servicios de alta tecnología a profesionales de la investigación. Los usuarios de la unidad SARA son los investigadores activos adscritos a dependencias intra y extrauniversitarias. La unidad SARA, cuenta con la infraestructura necesaria para desarrollar las técnicas analíticas de resonancia magnética nuclear (RMN), cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) y cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), las cuales son herramientas instrumentales que permiten discernir la naturaleza química de muestras de diversa procedencia. Esto permite una amplia participación en diversas disciplinas además de la catálisis como son biomedicina, química y ciencias ambientales, entre otras [13].

FIGURA 4. Instituto de Ingeniería.



El Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología (MICRONA) es una entidad académica de la Universidad Veracruzana, ubicada en la Ciudad de Boca del Río, Veracruz. Previamente inicia sus actividades en el 2003 como un Centro de Diseño en Tecnología MEMS (Sistemas Micro Electro Mecánicos); y en 2005, el Centro de Diseño MEMS expande su portafolio de desarrollo hacia el diseño y caracterización, no sólo de estructuras MEMS, sino de micro y nanotecnología. Uno de los objetivos principales que persigue MICRONA está relacionado con el desarrollo de micro y nanosistemas, en las áreas de instrumentación, sensado y automatización de procesos de manufactura industriales; a través del diseño, fabricación e implementación de micro y nanosistemas. MICRONA contribuye con el desarrollo científico y tecnológico del país, formando recursos humanos de alto nivel en las ramas de la micro y la nanotecnología [14].

En MICRONA, se encuentra el Laboratorio de Materiales Avanzados, donde se lleva a cabo la síntesis y caracterización de nuevos materiales, los cuales generalmente están constituidos por estructuras a nivel micro y nanométrico. Dicho laboratorio cuenta con equipamiento que permite satisfacer la mayoría de las necesidades de investigación a los estudiantes de posgrado durante su trabajo de tesis. El equipamiento se ha obtenido a través de la gestión de equipos para los laboratorios por medio de varios proyectos: propios de la UV, proyectos CONACYT, proyectos de vinculación con la industria. Estos equipos son básicos para el desarrollo de las investigaciones y se encuentran distribuidos, en áreas específicas, de la siguiente manera:

- Fabricación de nuevos materiales: orientada a la fabricación de nuevos materiales, tales como recubrimientos duros, materiales vitro-cerámicos, composites, etc. Para tal efecto, cuenta con un sistema de erosión catódica (*sputtering*) y un sistema de inmersión (*deep-coating*), donde los parámetros de crecimiento se encuentran bien controlados.
- Difracción de rayos X: alberga el equipo de difracción de rayos X; se realizan los estudios estructurales de los materiales cristalinos, así como el tipo de fase presente, el tamaño de grano y de manera cualitativa los esfuerzos y deformaciones presentes.
- Síntesis de materiales: corresponde al laboratorio de química, donde se realiza síntesis de diversos materiales mediante técnicas como sol-gel. Cuenta con lo necesario para realizar dichas síntesis, tales como muflas de altas temperaturas, balanza analítica, parrillas de agitación con temperatura, reactivos necesarios, material de laboratorio, etc.
- Microscopía electrónica de barrido: alberga un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo de reciente adquisición; con el cual se puede realizar estudios morfológicos a niveles nanométricos así como obtener la composición química de los materiales fabricados.



FIGURA 5. Laboratorio de Materiales Avanzados.

- Espectroscopía óptica: aquí se realizan caracterizaciones ópticas de absorción, transmisión, fotoluminiscencia, fotorreflectancia de los materiales fabricados. Cuenta con un láser verde, un monocromador, un amplificador *locking*, detectores de estado sólido, una fuente de luz (200-1700 nm).
- Dureza y tribología: cuenta con un microdurómetro Vickers y un microtribómetro, equipos destinados para el análisis de propiedades mecánicas de diferentes materiales, así como el comportamiento del desgaste que va sufriendo un material, cuando es sometido a diferentes condiciones de desgaste.

Perspectivas de la catálisis en la uv

El tema central de este artículo es la actividad en el área de catálisis en la Universidad Veracruzana. El trabajo a futuro es establecer las estrategias a seguir para continuar siendo competitivos a nivel nacional e internacional en los ámbitos de investigación, docencia y vinculación con el sector productivo, entre ellas:

- Formar recursos humanos bien capacitados y dedicados a hacer buena investigación.

- Mantener un crecimiento razonable en cuanto a publicaciones en revistas internacionales de alto impacto.
- Establecer redes con grupos de investigadores y cuerpos académicos de otras instituciones con miras a fortalecer nuestras líneas de investigación.
- Contar con una visión a futuro para la elección correcta de los campos de trabajo
- Realizar trabajos de investigación tanto en ciencia pura como aplicada.
- Establecer colaboraciones con la industria química mexicana.

Conclusión

La Universidad Veracruzana cuenta con el personal académico calificado y la infraestructura necesaria para realizar y generar proyectos de investigación en áreas relacionadas con la catálisis. La catálisis es una de las áreas más importantes en la investigación, sobre todo para los programas educativos de ingeniería química, que se imparten en sus cinco campus.

Referencias

Página institucional:

<www.uv.mx>

Otras:

1. <<http://www.uv.mx/percibete/regiones/>>
2. <<http://www.uv.mx/universidad/doctosofi/informe2015-2016/Discurso-III-Informe-2015-2016.pdf>>
3. <<http://www.uv.mx/posgrado/oferta-educativa/pnpc/>>
4. <<http://www.uv.mx/di/general/lineas-de-aplicacion-yo-generacion-del-conocimiento/>>
5. <<http://www.uv.mx/veracruz/mmicrona/lgac/lineas-de-generacion-y-aplicacion-del-conocimiento/>>
6. <<http://www.uv.mx/veracruz/miaplicada/docentes-e-investigadores/lineas-generacion-yo-aplicacion-del-conocimiento-del-programa/>>
7. <<http://www.uv.mx/mqb/docentes-e-investigadores/lineas-de-generacion-y-aplicacion-del-conocimiento/>>
8. <<http://www.uv.mx/mgas/docentes/lgac/>>
9. <<http://www.uv.mx/pozarica/mca/docentes-e-investigadores/lineas-de-generacion-y-aplicacion-del-conocimiento/>>
10. <<http://www.uv.mx/pozarica/egia/docentes-e-investigadores/lineas-de-generacion-y-aplicacion-del-conocimiento/>>
11. <<http://www.uv.mx/coatza/cq/>>

12. <<https://www.uv.mx/veracruz/insting/quienes-somos/historia-mision-y-vision/historia/>>
13. <<https://www.uv.mx/sara/introduccion/presentacion/>>
14. <<https://www.uv.mx/veracruz/microna/quienes-somos/informacion-general/>>

Laboratorio de Nuevos Materiales Nanoestructurados y Catálisis Heterogénea

División de Materiales Avanzados,
Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Vicente Rodríguez-González*

RESUMEN: El Laboratorio de Nuevos Materiales Nanoestructurados y Catálisis Heterogénea (LANOCAT) fue creado el año 2010 dentro de la División de Materiales Avanzados (DMAV) del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. (IPICYT). Actualmente es un laboratorio consolidado que apoya a estudiantes e investigadores a nivel regional, nacional e internacional vía colaboraciones y/o proyectos de investigación. En este documento se informa de la infraestructura del laboratorio y se describen las actividades de investigación que ahí se realizan: síntesis de nanomateriales, caracterización estructural y estudio de superficies activas, así como las respectivas aplicaciones en nanociencias y nanotecnología con énfasis en catálisis heterogénea. Se presenta una breve reseña del IPICYT, del posgrado en nanociencias y materiales de la DMAV perteneciente al Programa Nacional de Posgrados de Calidad del Consejo Nacional de Ciencia Tecnología (PNPC-CONACYT) así como de las líneas de investigación cultivadas en esta división. Finalmente se mencionan los laboratorios nacionales con que cuenta el IPICYT que complementan y apoyan de manera importante la investigación de frontera. Se describen las funciones de la Dirección de Vinculación, instancia encargada de apoyar la trasferencia de la ciencia básica para su aplicación con el objetivo de generar desarrollo tecnológico y promover la innovación y así coadyuvar al crecimiento científico y tecnológico sostenible y a la internacionalización del Instituto y de la ciencia en México.

PALABRAS CLAVE: Nanomateriales, nanociencias, sostenible, catálisis heterogénea, IPICYT, química de superficies, LINAN.

ABSTRACT: The Nanostructured New Materials and Heterogeneous Catalysis Laboratory (LANOCAT, for its acronym in Spanish) was created in 2010 in the Advanced Materials Department of The Institute for Scientific and Technological Research of San Luis Potosi, (IPICYT, for its acronym in Spanish). During the seven years of activity, the equipment of this laboratory give support to national and international researchers and students via collaborations or research grants. In this document, the laboratory infrastructure is described with the research areas such as nanomaterials synthesis, materials characterization, surface science and the nanoscience and nanotechnology applications focusing on heterogeneous catalysis. A brief introduction about IPICYT, the Nanoscience and Materials Graduate Program of the Advanced Materials Department which is recognized as of high quality by the National Quality Graduate Program of the National Council of Science and Technology (PNPC-CONACYT, for its acronym in Spanish). In addition the research lines cultivated in the Department will be briefly described. Finally, the national labora-

Recibido: 23 de enero de 2017. Aceptado: 4 de abril de 2017.

* Posgrado en Nanociencias y Materiales-División de Materiales Avanzados. Camino a la Presa de San José No. 2055, Edificio Beta. Lomas 4ta Sección, 78216, San Luis Potosí, SLP, México. IPICYT A.C. Tel (444)834 2000 ext.7295, Fax (444) 834 2010. Correspondencia: (catalisisbeta@ipicyt.edu.mx); (vicente.rdz@ipicyt.edu.mx); (linan@ipicyt.edu.mx).

tories that have been established at the IPICYT are outlined. The latter give strong support to perform original and cutting edge research together with the activities of Innovation and Knowledge Transfer Department which is also described because it helps the transfer process from fundamental science towards technological development and innovation; this contributes to sustainable scientific, technological growth and to the internationalization of our Institute and science in Mexico.

KEYWORDS: Nanomaterials, nanoscience, sustainable, heterogeneous catalysis, IPICYT, surface science, LINAN.

Introducción

El Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C., (IPICYT) es una asociación civil fundada por el gobierno del estado de San Luis Potosí, el Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología, la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, la Secretaría de Educación Pública, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, el Centro de Investigación en Matemáticas, A.C. y el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.

Es un centro público de investigación multi e interdisciplinario del sistema CONACYT fundado el 24 de noviembre del año 2000, y representa un esfuerzo importante en pro de la descentralización de las actividades científicas y tecnológicas en el país. Su fundación fue también posible gracias al interés y apoyo explícito del gobierno del estado de San Luis Potosí, quien aportó recursos para la construcción de los primeros edificios que albergan al Instituto (www.ipicyt.edu.mx).

Fue establecido con el propósito de proveer a la región de un espacio alternativo para el cultivo de las ciencias naturales y exactas, así como para desarrollar tecnologías vinculadas con la solución de problemas locales, regionales y nacionales. El Instituto considera también entre sus objetivos estratégicos la difusión y transferencia del conocimiento generado por sus actividades de investigación, así como la formación de recursos humanos de excelencia en campos del conocimiento de frontera.

El IPICYT cuenta con grupos de investigación de alta calidad que, además de generar conocimientos de frontera y formar recursos humanos a nivel licenciatura y posgrado, interaccionan con los diversos sectores de la sociedad para apoyar el desarrollo del San Luis Potosí y la región centro del país.

La investigación se realiza en los siguientes departamentos:

- **Biología Molecular**
<http://www.ipicyt.edu.mx/Biologia_Molecular/areas_biologia_molecular.php>
- **Materiales Avanzados**
<http://www.ipicyt.edu.mx/Materiales_Avanzados/areas_materiales_avanzados.php>

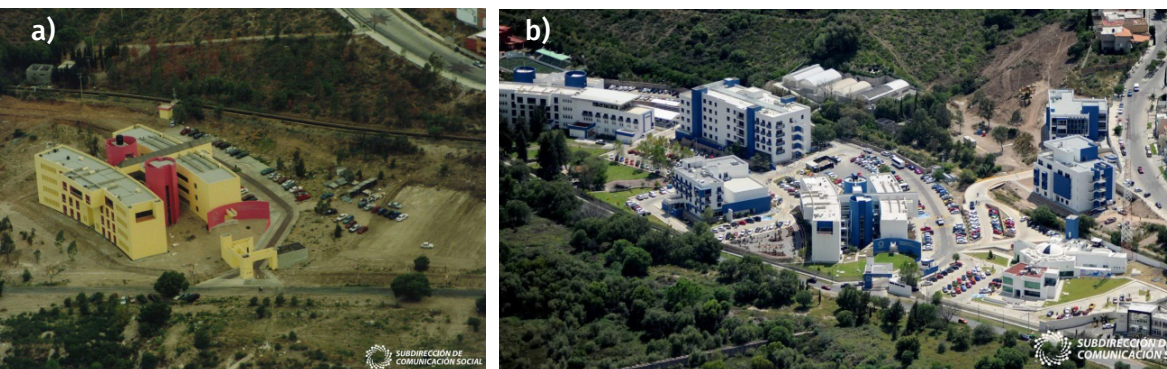


FIGURA 1. Fotografía de los edificios con que cuenta el IPICYT desde su creación (a) hasta la última imagen tomada en 2016 (b). A la izquierda de la imagen b) se pudo ver el edificio beta con dos torres donde se alberga la División de Materiales Avanzados y el Laboratorio de Nuevos Materiales y Catálisis Heterogénea.

- **Matemáticas Aplicadas**
<http://www.ipicyt.edu.mx/Matematicas_Aplicadas/areas_matematicas_aplicadas.php>
- **Ciencias Ambientales**
<http://www.ipicyt.edu.mx/Ciencias_Ambientales/areas_ciencias_ambientales.php>
- **Geociencias Aplicadas**
<http://www.ipicyt.edu.mx/Geociencias_Aplicadas/areas_geociencias_aplicadas.php>

Cabe destacar que una de las características distintivas del Instituto es abordar problemas de investigación de manera interdisciplinaria en las áreas de ciencias naturales y exactas. Aunque su compromiso inmediato está ligado al estado de San Luís Potosí, su misión ciertamente le permite trascender la región y tener cabida en los ámbitos nacional e internacional, debido a la excelencia de sus productos de investigación y a la oportunidad existente para los proyectos estratégicos que desarrolla en las áreas de conocimiento de su ámbito de competencia.

Para estos propósitos, cuenta con tres Laboratorios Nacionales y una Dirección de Vinculación:

- LANBAMA (Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental)
<<http://www.ipicyt.edu.mx/Lanbama/lanbama.php>>
- LINAN (Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y

Nanotecnología)

<<http://www.linan-ipicyt.mx/>>

- Laboratorio Nacional del CNS (Centro Nacional de Supercómputo)
<<http://www.ipicyt.edu.mx/Cns/cns.php>>

La infraestructura de los Laboratorios Nacionales así como los servicios que ofrecen, se pueden consultar en la página del instituto (www.ipicyt.edu.mx) o en los sitios web de cada División.

La Dirección de Vinculación

<<http://www.ipicyt.edu.mx/Vinculacion/vinculacion.php>>

Fue creada para construir puentes entre los investigadores y los sectores productivos y gubernamentales, y con el propósito de transferir conocimiento, hacer desarrollo tecnológico y promover la innovación para crear un impacto real en la sociedad. De igual manera, provee servicios relacionados con la vigilancia y protección tecnológica. Sus funciones se detallan en su sitio web.

División de Materiales Avanzados (DMAv)

El desarrollo de nuevos materiales nanoestructurados y sus crecientes aplicaciones en los últimos años ha impulsado las investigaciones en materiales y nanotecnología en todo el mundo. En la División estamos convencidos de que el descubrimiento de nuevas tecnologías debe estar basado en la comprensión de los conceptos científicos básicos, los cuales a su vez, darán pautas para proponer conceptos nuevos que puedan establecer el conocimiento de frontera.

En esta división se realiza la síntesis, caracterización y el empleo de nuevos materiales y nanoestructuras para su uso en aplicaciones emergentes. Nanomateriales como grafeno, titanias, nanotubos, nanocompuestos de carbono, materiales híbridos y biomateriales diversos. Asimismo, materiales magnéticos a base de diferentes aleaciones con propiedades calóricas con miras a utilizarse en aplicarse en aplicaciones tales como la refrigeración de estado sólido, generación de fuentes sustentables de energía, electrónica orgánica, sensores de gases. Finalmente, materiales para nanomedicina, inactivación de microorganismos patógenos, entre otros.

La investigación en el área de catálisis heterogénea y ciencia de materiales, tanto en el área de aplicación como de síntesis de nuevos materiales, se concentra en la DMAv y se agrupa en las siguientes líneas de investigación:

- (i) *Materiales y compuestos nanoestructurados*: fotocatalisis, nanocompuestos, producción de hidrógeno, electrónica orgánica, sensores de gases.
- (ii) *Materiales magnéticos*: refrigeración electromagnética, aleaciones con memoria de forma

- (iii) *Biomateriales y bionanotecnología*: biofuncionalización, biofísica molecular, inactivación de microorganismos, nanomedicina.

El área de investigación en nanomateriales aplicados a catálisis heterogénea y nanotecnología se desarrolla generalmente en el Laboratorio de Nuevos Materiales y Catálisis Heterogénea (LNMyCH) con importante apoyo del LINAN. Las diversas investigaciones de frontera se enfocan en:

- i) El desarrollo de nuevos materiales nanoestructurados con propiedades catalíticas y semiconductoras (nanocompuestos grafeno-óxidos metálicos, óxidos con crecimiento preferenciales, nanoestructuras facetadas, NPs metálicas de Au, Ni, Ag, Cu, Pd, etc.). Materiales mesoporosos ordenados de SiO_2 , TiO_2 y Al_2O_3 .
- ii) Caracterizaciones generalmente enfocadas en la determinación y cuantificación de sitios activos superficiales así como para interpretación con espectroscopías FTIR y UV-vis-NIR *in-situ* en función de atmósfera y temperatura, determinación de planos expuestos y crecimiento preferencial en nanocatalizadores y materiales con morfología controlada 1D-3D por microcopias electrónicas y espectroscopía fotoelectrónica de rayos X.
- iii) Las aplicaciones son diversas: procesos de oxidación avanzada, reacciones catalíticas inducidas a baja temperatura e inactivación de microorganismos patógenos, degradación solar y fotoasistida de disruptores endócrinos y fármacos, así como también para materiales para la dosificación controlada de fármacos y producción fotocatalítica de hidrógeno.

Infraestructura del LANOCAT

La infraestructura del Laboratorio de Nuevos Materiales Nanoestructurados y Catálisis Heterogénea se enumera a continuación:

- i) Síntesis de nanomateriales.
 - Reactor hidrotérmico asistido por microondas, Eyela MWO-1000 Wave Magic capacidad 150 mL.
 - Reactores pyrex para síntesis sol-gel diseño propio del grupo de investigación, con sistema de reflujo y calentamiento homogéneo.
 - Sistema de fotodeposición de nanopartículas metálicas de Ag, Cu, Co, Sn etc. sobre diferentes estructuras de óxidos mixtos y grafeno.
 - Sistema para síntesis fotoasistida de nanopartículas metálicas con lámparas LEDs a diferentes longitudes de onda y UV.
 - Sistema de síntesis pyrex de nanoalambres por el método poliol con reflujo y adición controlada.
 - *Spin Coater* Model KW-4A, *Two Stage Spinning*, 110 /60 Hz para el

depósito de películas delgadas de óxidos mixtos y nanoestructuras de carbono.

- Depósito de recubrimientos de óxidos mixtos y materiales de carbono por aerografía y doctor-blade.
- Sistemas de filtrado a vacío para neutralización y lavado de óxidos mixtos y grafeno.
- Hornos de secado, FELISA, para secado hasta 250 °C, y sistemas de secado a vacío hasta 200 °C.

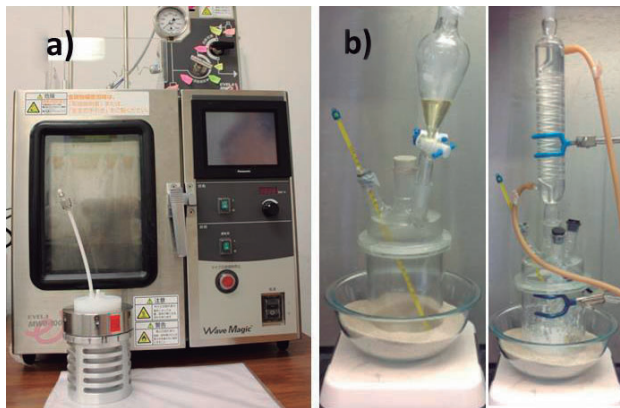


FIGURA 2. Equipos y accesorios para síntesis de nanomateriales: a) reactor de microondas Eyela MWO-1000 Wave Magic; b) reactor de síntesis sol-gel con adición controlada y sistema de condensación.

FIGURA 3. a) Reactor de síntesis por métodos foto-inducidos; b) estufas de secado al vacío y mufla de calcinación a 1000 °C; c) mufla de calcinación hasta 1200 °C.



- Muflas para calcinación hasta 1000 y 1200 °C (con 5 rampas para tratamientos térmicos controlados).
- ii) Caracterización
 - Espectrofotómetro UV-vis-NIR equipado con esfera de integración (Agilent Cary 5000) con accesorios para líquidos, sólidos, y películas delgadas y cámara Praying mantis de reacción para estudios con atmósfera controlada y temperatura (DR-UV-vis).
 - Equipo de fisiorción de nitrógeno Quantachrome Nova3200e para área superficial específica y determinación de tipo de mesoporosidad.
 - Equipo de quimisorción de gases en función de la temperatura, (TPR, TPO,TPD) ChemBET de Quantachrome.
 - Medidor de carbono orgánico total –TOC-L de Shimadzu, mide hasta ppm de COT.
 - Espectrofotómetro infrarrojo con trasformada de Fourier, sólidos, líquidos y reactor Praying Mantis para DRIFTS y con una cámara de reacción con modulación de temperatura de Harrick, IR-Tracer-100 de Shimadzu.
 - Potenciostato/Galvanostato modelo VSP300 con chasis modular

FIGURA 4. Equipos de caracterización fisicoquímica: a) fisiorción de nitrógeno; b) quimisorción de gases sonda; c) potenciostato/galvanostato, y, d) determinador de carbón orgánico disuelto.

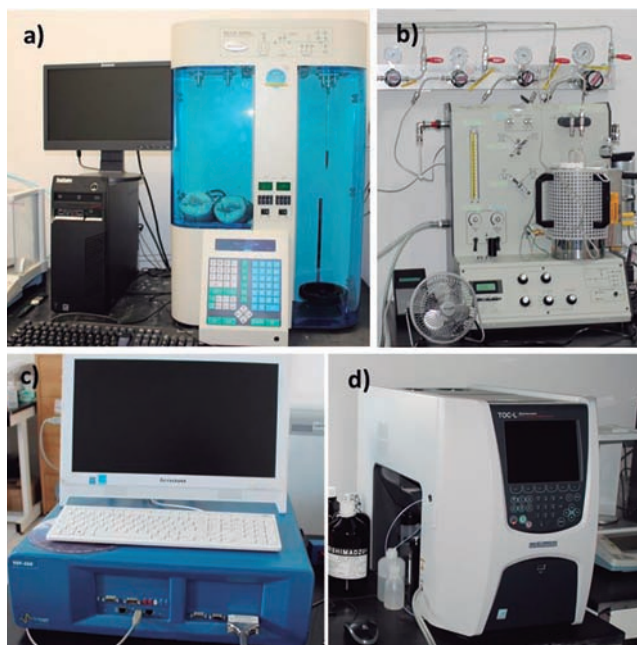




FIGURA 5. Espectrofotómetros: a la izquierda (a) Infrarrojo con trasformada de Fourier, y, la derecha (b) Ultravioleta-visible con Infrarrojo cercano, ambos equipados con esfera de reflectancia difusa y cámara pyrolyzing para caracterización *in situ* en función de la temperatura o atmósfera controlada (c) y adsorción de piridina (d).

para 6 slots independientes VSP-300 Bio-Logic Science Instruments SAS.

- Fuente de voltaje-corriente (Keithley 4200) de cuatro puntas.
- iii) Evaluación
 - Cromatógrafo de gases GC-TCD (Thermo Scientific, TRACE GC Ultra) equipado con una columna empacada TG-BOND Msieve 5A, para monitoreo de la producción de hidrógeno.
 - Cromatógrafo de gases GC-FID (Thermo Scientific, TRACE GC Ultra) equipado con una columna empacada PONA, para la evaluación de reformación de hidrocarburos.
 - Cromatógrafo de gases GC-MS (Agilent, 5977 Series GC/MS Systems).
 - HPLC cromatógrafo de líquidos de alta eficiencia con fotodetector y detector de aniones y cationes.
 - 2 reactores de evaluación fotocatalítica con aislante de fuentes luminosas de madera, con diferentes irradiaciones UV, visible y LED, agitación y burbujeo de oxígeno.

Integrantes del laboratorio

El investigador responsable de LANOTEC es el autor de este trabajo, quien realiza el trabajo del laboratorio en colaboración con posdoctorantes (vía convocatoria del CONACYT) y estudiantes de doctorado, maestría y licen-

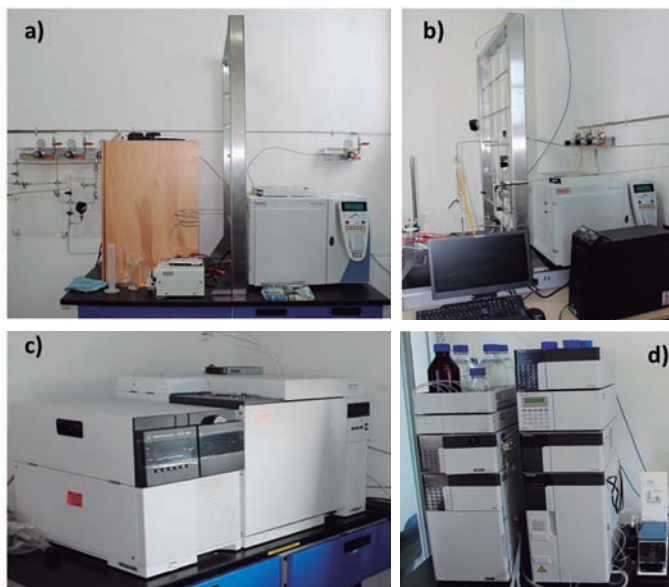


FIGURA 6. Cromatógrafos para evaluación de la reacciones catalíticas y productos: a) producción fotocatalítica de hidrógeno; b) reformación de hidrocarburos; c) GC-MS para estudio de los posibles mecanismos y productos, y, d) HPLC aniónico-catiónico.

ciatura, el promedio anual varía entre 5 y 10 colaboradores. Además, el laboratorio es sede para estudiantes del “Verano de la Investigación Científica”. El apoyo técnico especializado lo brinda fundamentalmente el Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología (LINAN).

Posgrado en Nanociencias y Materiales

El Posgrado de Nanociencias y Materiales está adscrito a la DMAV y cuenta con las modalidades de maestría y doctorado. Además apoya la realización de tesis de licenciatura de diferentes universidades e institutos nacionales e internacionales, así como estancias de veranos de los programas existentes en el país (prácticas profesionales, servicio social, cotutorías, colaboraciones). El posgrado fue evaluado en 2011, obteniendo el PNPC-CONACYT y refrendándolo en 2014, para 2017 se contempla obtener el PNPC internacional.

Para la realización de sus actividades el posgrado tiene acceso a todos los equipos que conforman el Laboratorio Nacional de Investigaciones de Nanociencias y Nanotecnología que cuenta con una de las mayores infraestructuras a nivel de Laboratorios Nacionales enfocado a servicios de análisis y caracterización de materiales de alta calidad para el desarrollo de la nanociencia y la nanotecnología en México. El posgrado también utiliza las instalaciones del Centro Nacional de Supercómputo, para llevar a cabo simulaciones mole-

culares que tienen el objetivo de entender una gran variedad de propiedades fisicoquímicas, electrónicas y magnéticas.

Una de nuestras fuerzas radica en las diversas colaboraciones internacionales con que contamos, así como la gran movilidad de nuestros estudiantes que realizan estancias en EUA, Canadá, Latinoamérica, Asia y Europa. Por tanto, las opciones de nuestro posgrado tienen carácter multidisciplinario e internacional.

La misión de la DMAV es ofrecer un posgrado multidisciplinario, líder en la formación de recursos humanos de calidad internacional en el área de Nanociencias y Materiales. Que nuestros egresados cuenten con prestigio, reconocimiento social, y sean capaces de adaptarse a nuevos retos. Asimismo, los egresados se distingan por su independencia, liderazgo, compromiso social y competitividad en el desarrollo científico en general y nanotecnológico en particular.

Formar recursos humanos en áreas estratégicas de innovación y prioritarias en México para los sectores privado, gubernamental y académico.

Fortalecer la investigación de vanguardia mediante la incorporación de estudiantes a proyectos estratégicos de la institución. Alcanzar una vinculación óptima con los sectores públicos y privados mediante la capacitación y actualización continua del cuerpo académico, la innovación y el fortalecimiento de la infraestructura. Con ello, convertirnos en un polo científico nacional con reconocimiento internacional en las áreas de materiales y nanotecnología.

Productos académicos y formación de estudiantes

Desde la creación del grupo de Nuevos Materiales Nanoestructurados y Catálisis Heterogénea del IPICYT en 2010 se han producido 40 publicaciones internacionales indizadas, graduado 5 estudiantes de doctorado, 5 de maestría 12 de licenciatura de diferentes regiones del país y de Colombia, se ha atendido a cerca de 45 veranos de la ciencia y estancias (becas mixtas, servicio social, estancias técnicas, etc.).

Cuatro proyectos han hecho posible la consolidación del grupo, proyectos de la convocatorias innova, ciencia básica, infraestructura y de cooperación con Corea del Sur y España financiados por sus gobiernos, intercambios académicos con la Universidad de Cincinnati, la Universidad de Bogotá y la Universidad Industrial de Santander, entre otras.

El grupo ha participado en la organización de los congresos internacionales: 2nd. Latin-American Congress of Photocatalysis and TiO_2 (LACP 2013) celebrado en Guadalajara en septiembre de 2013, y, 3rd Latin-American Congress of Photocatalysis, Photoelectrochemical and Photobiology, realizado exitosamente en las instalaciones del IPICYT en octubre de 2014 (3er-LACP-2014), dando pie a 3 números especiales en las revistas indizadas internacionalmente: *Journal Hazardous Materials* (FI 5.12), *Catalysis Today*

(FI 3.42) *Journal Environmental Chemical Engineering* (nuevo en 2013). Actualmente se mantienen las siguientes colaboraciones internacionales y nacionales:

- Universidad Sun Moon, Corea del Sur.
- University of Cincinnati, USA.
- Loughborough University, UK.
- Universidad Autónoma de Madrid.
- Universidad Industrial de Santander.
- Universidad de Cartagena.
- Universidad de Bogotá–Fundación Tadeo Lozano.
- Universidad Autónoma Metropolitana–Iztapalapa.
- CCADET-UNAM.
- IF-UNAM.
- Universidad de Zacatecas.
- Universidad. Guanajuato.
- Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- IIM-UNAM.
- Divisiones de Biología Molecular y Ciencias Ambientales del IPICYT.

Referencias y apoyos

1. Sitio institucional:
<www.ipicyt.edu.mx>.
2. Sección especial:
Rodríguez González, Vicente; Pérez Larios, Alejandro y Li Puma, Gianluca (eds.). (2013). Photocatalysis: From the treatment of emerging contaminants to energy conversion *Journal of Hazardous Materials*, vol. 263, parte 1, diciembre 15. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.11.001>>
<<http://www.sciencedirect.com/science/journal/03043894/263/part/P1>>
3. Número especial:
Rodríguez González, Vicente; Hernández Gordillo, Agileo y Hang Hu, Yan (eds.). (2016). Novel nanomaterials for photocatalysis, photochemistry, and photobiology. *Catalysis Today*, vol. 266, 1-226, mayo 15, <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2016.02.012>>
<<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09205861/266>>.
4. Rodríguez González, Vicente; Zanella Specia, Rodolfo; Hinojosa Reyes, Mariana (eds. responsables). (2014). *Abstract Book from the 3rd Latin-American Congress of Photocatalysis, Photochemistry and Photobiology*. San Luis Potosí-IPICYT, octubre 14-17.
5. <<https://sites.google.com/a/ipicyt.edu.mx/vicenterodriguez/>>
6. <http://www.ipicyt.edu.mx/Materiales_Avanzados/areas_materiales_avanzados.php>

7. Rodríguez González, Vicente; Li Puma, Gianluca; Dionysios, Dionysiou y Rodolfo Zanella Specia. (2015). Special Section on Photoassisted IPICYT-2014. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 3, núm. 4, parte B, 3037-3062 pp., diciembre.

Unidad de Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán

Juan Carlos Chavarría Hernández,* Luis Carlos Ordóñez López,**
Beatriz Escobar Morales,*** Daniela Esperanza Pacheco Catalán****

RESUMEN: En esta contribución se describen las actividades de investigación y desarrollo tecnológico que se realizan en áreas relacionadas con la catálisis, así como con nanociencias y nanotecnología (nyn) en la Unidad de Energía Renovable (UER) del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). Se hace una breve reseña de los orígenes de la UER del CICY, así como del número de investigadores y técnicos académicos que desarrollan temas de investigación relacionados con la catálisis y nanotecnología. Asimismo, se describe de manera resumida la infraestructura con la que cuenta actualmente la UER del CICY disponible para la ejecución de proyectos relacionados con estos temas de investigación. Se menciona también un listado de instituciones de investigación y educación superior con las cuales la UER del CICY tiene colaboraciones a diferentes niveles de formalidad para la realización de los proyectos de investigación relacionados con catálisis y nanotecnología. Por otra parte, se hace mención de los programas de maestría y doctorado impartidos en la UER del CICY a través de los cuales se forman recursos humanos especializados en áreas de energía renovable, indicando el número de estudiantes de posgrado, así como de licenciatura que la UER del CICY ha formado en temas relacionados con catálisis y nanotecnología. Finalmente, se describen brevemente algunas áreas de oportunidad y perspectivas de crecimiento en los temas referidos en el corto y mediano plazos.

PALABRAS CLAVE: UER-CICY, líneas de investigación, energía renovable, catalizadores heterogéneos, electrocatalizadores.

ABSTRACT: This contribution describes the research and technological development activities carried out in areas related to catalysis, as well as nanosciences and nanotechnology (nyn) at the Renewable Energy Unit (UER) of the Center for Scientific Research of Yucatan (CICY). A brief overview of the origins of the UER is made, and the number of researchers and academic technicians who develop research topics related to catalysis and nanotechnology is mentioned. The infrastructure currently available at the UER for the execution of projects related to these research topics is also described in a summarized way. A list of research and higher education institutions with which UER collaborates in different levels of formality for the realization of research projects related to catalysis and nanotechnology is also given. On the other hand, mention is made of the master's and doctoral programs taught at the UER, through which specialized human resources are trained in the areas of renewable energies, as well as the number of graduate and undergraduate students who have developed their thesis projects at the UER on

Recibido: 24 de enero de 2017. Aceptado: 3 de mayo de 2017.

* CICY-Unidad de Energía Renovable (UER), Parque Científico y Tecnológico de Yucatán. Carretera Sierra Papacal-Chuburna Puerto, km 5. Sierra Papacal, C.P. 97302, Mérida, Yucatán, Tel.: (999)930 0760, ext. 1206. Correspondencia: (jc.ch@cicy.mx).

** CICY-UER. Tel.: (999)930 0760, ext. 1205. Correspondencia: (lcol@cicy.mx).

*** CICY-UER. Tel.: (999)930 0760, ext. 1203. Correspondencia: (beatriz.escobar@cicy.mx).

**** CICY-UER. Tel.: (999)930 0760, ext. 1202. Correspondencia: (dpacheco@cicy.mx).

issues related to catalysis and nanotechnology. Finally, some areas of opportunity and growth prospects in the aforementioned topics in the short and medium terms are briefly described.

KEYWORDS: UER-CICY, research lines, renewable energy, heterogeneous catalysts, electrocatalysts.

Introducción

La Unidad de Energía Renovable (UER) del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), cuya fachada principal se muestra en la figura 1, es una de las seis unidades académicas (Bioquímica y Biología Molecular de Plantas, Biotecnología, Ciencias del Agua, Materiales, Recursos Renovables y Energía Renovable) de este Centro, el cual pertenece al Sistema de Centros Públicos de Investigación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). La UER se creó en 2010 como producto de la evolución de una parte del grupo de trabajo de la Unidad de Materiales enfocada al desarrollo de aplicaciones en temas de energía, así como del Programa Institucional de Bioenergía creado en el CICY en 2006. Su misión es fomentar las fuentes de energía renovable a través de la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la formación de recursos humanos de alto nivel, enfocándose en temas de bioenergía, tecnología del hidrógeno y sistemas híbridos de energía. Actualmente, la UER cuenta con diez investigadores, de los cuales cuatro realizan investigación o desarrollo tecnológico en áreas relacionadas con catálisis y nanotecnología, apoyados por cuatro técnicos académicos. En la UER se imparten programas de maestría y doctorado inscritos en el Padrón Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del CONACYT, siendo la población actual de alumnos de posgrado de aproximadamente 60 estudiantes. En el 2013, la UER movió su sede del campus Mérida del CICY al Parque Científico y Tecnológico de Yucatán, localizado en la carretera Sierra Papacal-Puerto de Chuburná. Dicho parque es un polo de desarrollo científico y tecnológico de la región, que reúne a varias instituciones de alto nivel como son: CINVESTAV, CIATEJ, CIMAT, CIESAS, UNAM, UADY, CICY, así como a empresas y dependencias científicas como la Secretaría de Investigación, Innovación y Educación Superior del Estado de Yucatán y el CONACYT, entre otras.

Líneas de investigación, desarrollo e innovación relacionadas con la catálisis

En la UER se desarrollan tres líneas de generación y aplicación del conocimiento: bioenergía, tecnología del hidrógeno y sistemas híbridos de energía. Las dos primeras se crearon en 2010 y la última en 2016. En la línea de bioenergía se sintetizan y evalúan catalizadores para estudiar la transformación de biomasa en combustibles líquidos renovables, principalmente bioturbosina, diésel renovable, biogasolina y biodiesel. Entre los materiales empleados se encuentran zeolitas tales como la ZSM-22 y la ZSM-5; materiales



FIGURA 1. Entrada al edificio principal del edificio de la Unidad de Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán.

mesoporosos como son la SBA-15 y la MCM-41. Los prototipos catalíticos son caracterizados por diferentes técnicas fisicoquímicas (XRD, SEM-EDX, FTIR, fisisorción de N_2 , etc.), posteriormente su actividad es evaluada en procesos de obtención de biocombustibles que incluyen la hidrodesoxigenación (HDO) o hidrotratamiento (HT), y un proceso catalítico de tres etapas de reacción consecutivas conocido como ATJ (*alcohol to jet*). Como materia prima para el proceso de HDO se utilizan triglicéridos y otros lípidos presentes en aceites vegetales (jatropha, higuerilla), grasas animales (pollo), aceites comestibles usados y aceite de microalgas. También se estudia una modalidad de desoxigenación catalítica (DO) a baja presión y bajo consumo de hidrógeno. Para el proceso ATJ se emplea bioetanol como materia prima. La caracterización de los productos de reacción se realiza mediante técnicas de GC-MS, FTIR y análisis elemental CHONS principalmente.

En la línea de tecnología del hidrógeno se trabaja con distintos materiales a escala nanométrica cuyo fin es utilizarlos como fases activas o soportes de electrocatalizadores para las reacciones de electrodo en celdas de combustible de hidrógeno de membrana de intercambio protónico (PEM-FC), celdas de combustible de alcohol directo (DAFC), o bien, en dispositivos electroquímicos de almacenamiento de energía como son capacitores electroquímicos (supercapacitores) o baterías. Las principales reacciones electroquímicas que se estudian son: la electrooxidación de alcoholes de bajo peso molecular como metanol o etanol, la reducción electroquímica de oxígeno o de CO_2 , la evolución de oxígeno; así como también se estudian los fenómenos de almacenamiento de carga electrostática o por procesos pseudocapacitivos como reacciones redox, procesos de adsorción o de intercalación, los cuales pueden estudiarse por medio de los procesos cíclicos de carga y descarga.

Para la obtención de materiales para las diferentes aplicaciones, se emplean como fases activas metálicas nanopartículas de Pt, Pd, Ni promovidas con Mo, Ru, Sn, etc., y como soportes se emplean materiales de carbono como negro de humo, nanotubos de carbono, óxido de grafeno, polímeros conductores como polipirrol, polianilina, o bien, distintos materiales compuestos. También se estudia la incorporación de nitrógeno o azufre como agentes dopantes de los soportes catalíticos. Los materiales son sintetizados a través de distintos procesos entre ellos: métodos coloidales, por medio del uso de plantillas, el uso de diferentes reductores químicos de sales precursoras, etc. La evaluación física de estos materiales se realiza por medio de la difracción de rayos X (DRX), espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS), microscopías electrónicas de barrido o de transmisión. Además, se emplean las técnicas espectroscópicas de infrarrojo (FTIR), RAMAN, y análisis elemental (CHONS). Otra técnica que también se emplea es la microscopía de fuerza atómica (AFM), la cual permite evaluar distintas propiedades de la superficie de los electrodos. Finalmente, las determinaciones de la actividad catalítica se realizan por medio de técnicas electroquímicas de corriente directa y espectroscopía de impedancia electroquímica. Posteriormente, los materiales obtenidos se prueban en prototipos de celdas de combustible o de supercapacitores desarrollados en la misma UER.

Además del desarrollo de catalizadores inorgánicos, poliméricos y organometálicos, se desarrollan membranas; se optimiza la fabricación de los ensambles electrodo-membrana-electrodos (EME), se simulan y fabrican diferentes prototipos a pequeña escala de platos bipolares, celdas PEM y celdas reversibles (unificadas).

Colaboraciones y proyectos

La Unidad de Energía Renovable del CICY colabora con diferente grado de acercamiento con distintas instituciones de educación superior (IES) y centros públicos de investigación (CPI) de la península de Yucatán y otras regiones del país para la elaboración de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico, así como la codirección de tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Entre estas instituciones se encuentran:

- Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR).
- Universidad de Quintana Roo (UQROO).
- Universidad Autónoma de Yucatán (UADY).
- Facultad de Química de la UNAM.
- Universidad Politécnica de Tlaxcala.
- Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT).
- Universidad de Guanajuato.
- Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Universidad de Querétaro.

- Instituto Tecnológico de Chetumal.
- Instituto Tecnológico de Mérida.
- Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.
- Instituto Tecnológico de Cancún.
- Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
- CINVESTAV, unidad Mérida y unidad Saltillo.
- Instituto de Energías Renovables de la UNAM.
- Instituto Mexicano del Petróleo, sede Ciudad de México, entre otros.

La colaboración en el tema de biocombustibles se ha realizado principalmente para el desarrollo y evaluación de actividad de catalizadores para los procesos de hidroxigenación de aceites en la obtención de hidrocarburos con potencial para emplearse como combustibles renovables: bioturbosina y diésel verde. En el tema de tecnología del hidrógeno se ha colaborado en la preparación de nanoestructuras de polímero intrínsecamente electroconductor, así como el estudio de su actividad electrocatalítica y de sus propiedades en sistemas electroquímicos de energía. Otro tema de colaboración es la electrooxidación de etanol empleando catalizadores bimetálicos PtMe (Me = Mo, Sn y Ru) soportados ya sea en carbón, polipirrol o titanio, así como el desarrollo de prototipos de respaldo de energía en casos de desastre natural. Uno de los proyectos emblemáticos que lideró la UER del CICY trabajando en colaboración con otras siete instituciones de la región es el proyecto Laboratorio de Energías Renovables del Sureste (LENERSE), creado para impulsar la implementación de las energías renovables en la región sureste del país, mediante el desarrollo de tecnologías, la investigación científica, la vinculación y la formación de recursos humanos (ver figura 2).

FIGURA 2. Edificio del Laboratorio de Energías Renovables del Sureste (LENERSE), ubicado a un costado del edificio de la UER.



Este proyecto tendrá su continuación en el proyecto Consolidación del LERNERSE, recientemente aprobado y que será financiado por el fondo de sustentabilidad energética SENER-CONACYT.

Por otra parte, los académicos de la UER que desarrollan proyectos relacionados con la catálisis tienen una participación activa en la Red Temática del Hidrógeno y en la Red Temática de Bioenergía, ambas del CONACYT, así como en el Clúster de Bioturbosina, uno de los cinco clústers (biocombustibles sólidos, bioalcoholes, biodiesel, biogás y bioturbosina) que conforman el Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía (CEMIE-Bio), financiado por la Secretaría de Energía y el CONACYT a través del Fondo de Sustentabilidad Energética. En el Clúster Bioturbosina, la UER del CICY participa con las siguientes instituciones, que incluyen a otros siete centros CONACYT:

- Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR).
- Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT).
- Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ).
- Centro de Investigación en Alimentos y Desarrollo (CIAD).
- Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA).
- Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ).
- Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ).
- Instituto Mexicano del Petróleo (IMP).
- Instituto MASDAR, de los Emiratos Árabes Unidos.

Además, en este proyecto se firmó un convenio de entendimiento entre los participantes del Clúster, Boeing, Aeroméxico y Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA).

En lo que respecta a la colaboración internacional, se han establecido vínculos para desarrollar conjuntamente temas relacionados con la catálisis y/o Nyn con las siguientes instituciones:

- Universidad de Purdue, en Estados Unidos.
- Institute for Advanced Energy Technologies “Nicola Giordano” (CNR-ITAE).
- Instituto de Tecnología de Polímeros del CSIC, en Madrid España.

Infraestructura

La Unidad de Energía Renovable del CICY cuenta con los laboratorios de tecnología del hidrógeno, biocombustibles, biorreactores, síntesis, sistemas híbridos de energía, caracterización de materiales, así como con una planta piloto-taller y un cuarto de cultivo, sumando un área de 1,200 m². Los edificios

de la UER tienen espacios y servicios para poder realizar adecuadamente actividades de investigación, desarrollo tecnológico y formación de recursos humanos de alto nivel. Los principales equipos con que cuenta actualmente la UER son:

- Microscopio de fuerza atómica.
- Cromatógrafo de gases.
- Dos cromatógrafos de gases acoplados a detectores de masas.
- Cromatógrafo de líquidos de alta resolución.
- Ultra-congelador.
- Espectrofotómetros UV-vis, FTIR y RAMAN.
- Analizador elemental CHONS.
- Difractómetro de rayos X D2 Phaser.
- Reactor de lecho fijo para estudios de actividad catalítica.
- Hornos para calcinación, uno horizontal con tres zonas de calentamiento hasta 1000 °C y dos verticales hasta 600 °C.
- Potenciostatos-galvanostatos.
- Sistema de electrodo de disco y anillo rotatorio.
- Estaciones de evaluación de celdas de combustibles.
- Equipo de análisis textural (BET).
- Mesa óptica.
- Cámaras de electroforesis para gel de agarosa y de poliacrilamida.
- Termociclador.
- Fotodocumentador.
- Evaporador rotatorio.
- Cortadores con control numérico.

También cuenta con equipos convencionales como campanas de extracción y de flujo laminar, incubadoras, estufa desecado, refrigeradores, parrillas de calentamiento y agitación, balanzas, potenciómetros, sistema de purificación de agua, bombas de vacío y otros equipos auxiliares en el quehacer diario del personal y estudiantes. En las figuras 3 a 5 se muestran algunos de los equipos mencionados.

FIGURA 3 Reactor de lecho fijo modelo, microactivity reference, para evaluación de actividad catalítica y equipo de fisiorción de nitrógeno.



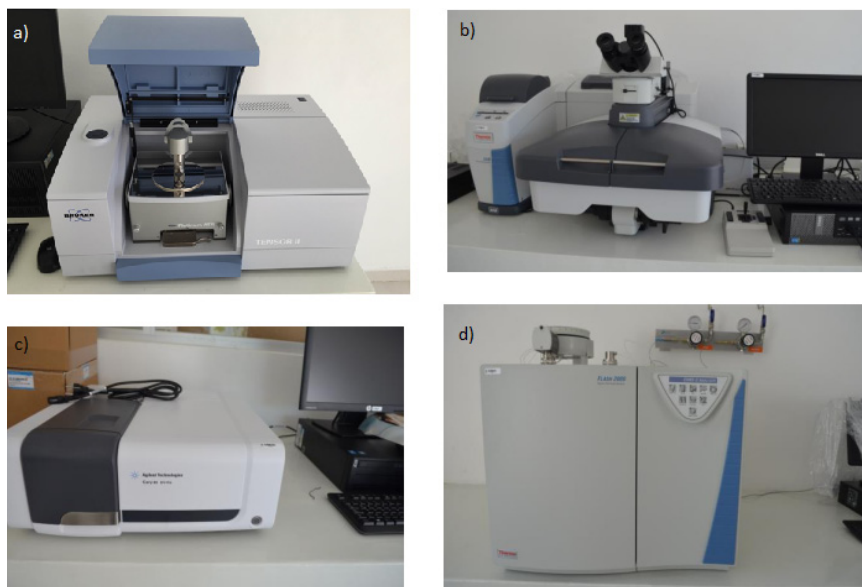


FIGURA 4. Equipos del Laboratorio de Caracterización de Materiales: a) FTIR; b) Raman; c) UV-vis, y, d) analizador elemental CHONS.

FIGURA 5. a) Laboratorio de Electrocatalisis; b) microscopio de fuerza atómica (AFM); c) estaciones de celdas de combustible, y, d) electrodo de disco rotatorio y de anillo.





FIGURA 6. Académicos y estudiantes de la UER del CICy, 2015.

Docencia y formación de recursos humanos

Para la formación de recursos humanos, la UER cuenta con un programa de doctorado en ciencias y uno de maestría en ciencias en energía renovable, enfocados a la investigación y pertenecen al PNPC. El programa de maestría comenzó en 2008 y actualmente tiene el nivel de consolidado, mientras que el programa de doctorado inició en 2010 y está catalogado como un posgrado en desarrollo. Se atiende principalmente a egresados de la región sureste, si bien se cuenta con participación de estudiantes del centro y norte del país, así como con algunos estudiantes extranjeros. Los alumnos que ingresan son de las carreras de biología, física, química y de ingenierías afines. Adicionalmente, la UER de CICy atiende estudiantes de licenciatura para el desarrollo de servicio social, prácticas profesionales o realización de tesis. La formación de recursos humanos en temas de catálisis, NyN, incluye hasta ahora 2 tesis de doctorado, 12 de maestría y 11 de licenciatura concluidas. En la siguiente figura se muestra el personal científico y técnico de la UER, así como a los estudiantes de posgrado adscritos a esta Unidad para el año 2015.

Principales logros en el área de la catálisis

Se han desarrollado catalizadores efectivos para la desoxigenación de aceites y grasas y la obtención de hidrocarburos con buenas propiedades para emplearse como combustibles líquidos renovables, diésel verde y bioturbosina. Los materiales estudiados están considerados para llevar a cabo la desoxige-

nación más isomerización más el rompimiento en una sola etapa de reacción en el procesamiento de lípidos. En este proceso se han empleado catalizadores metálicos soportados en materiales zeolíticos. Por otra parte se ha avanzado en el estudio de una modalidad de la desoxigenación que consiste en un menor consumo de hidrógeno y que permite de igual manera obtener hidrocarburos con alto valor para emplearse como combustible diésel. Para este proceso se han empleado principalmente catalizadores soportados en materiales mesoporosos como la SBA-15.

Asimismo, se ha avanzado en el desarrollo de electrocatalizadores nanométricos para la oxidación de alcoholes de bajo peso molecular en celdas de combustible. Se han obtenido buenos resultados con bajos contenidos de metales nobles (Pt) al incorporar promotores como Ru, Mo, Sn. También se ha logrado obtener actividades catalíticas importantes en condiciones alcalinas al emplear fases activas basadas en Ni. Uno de los problemas para el desarrollo de catalizadores para celdas de combustible es el proceso de corrosión que sufren los soportes de carbón; como alternativa se han desarrollado soportes basados en polímeros intrínsecamente conductores con tamaños de partícula controlada.

También se tienen avances importantes en la obtención de materiales nanométricos para el almacenamiento electroquímico de carga para su aplicación en electrodos de supercapacitores. Se han establecido metodologías para la obtención y funcionalización de óxido de grafeno para evitar su reapiamiento. Y se ha obtenido grafeno por CVD, en no más de 5 capas, por lo que se continúa trabajando para lograr la obtención de la monocapa.

Perspectivas sobre el estudio de la catálisis

En el grupo de trabajo de la UER-CICY que trabaja en temas de catálisis y nanotecnología se vislumbran entre otras las siguientes áreas de oportunidad y perspectivas de crecimiento en el corto y mediano plazo:

Desarrollar catalizadores más eficientes para el proceso de obtención de combustibles líquidos renovables a partir de aceites y grasas, con los cuales sea posible modular de manera más adecuada el nivel de craqueo de forma tal que la pérdida de rendimiento líquido sea mínima, mientras se logran niveles de isomerización altos para permitir obtener combustibles con buenas propiedades de flujo en frío. Por otra parte, en el tema de catalizadores para el proceso ATJ a partir de bioetanol, se trabajará de manera especial en el desarrollo de catalizadores efectivos para la reacción de oligomerización de etileno, siendo ésta la reacción crítica para lograr la viabilidad técnica y económica del proceso.

En otro tema, se ha identificado que uno de los problemas que impiden que la comercialización de las celdas de combustible sea factible es el alto costo de los materiales catalíticos y la tolerancia que éstos tienen hacia la

presencia de CO y otras especies intermediarias. En este sentido se pretende desarrollar materiales catalíticos libres de metales como Pt, Ru, Pd o Ir. Se busca trabajar en condiciones alcalinas, es decir, emplear como electrolitos, membranas de intercambio aniónico. Esto abre la posibilidad de emplear como fase activa metales económicos como el Ni. De esta manera, se examina la posibilidad de incrementar la actividad del Ni a través de la modificación de su estructura, el dopaje o la deposición sobre soportes con propiedades interesantes.

Por otra parte, se continuará con el desarrollo de materiales nanoestructurados para aplicaciones en tecnología del hidrógeno y energías renovables, y su consecuente implementación en prototipos de generación de energía más amigables con el medio ambiente. Otro aspecto que es de interés del grupo a corto plazo se centra en la síntesis verde, caracterización y funcionalización de nanopartículas metálicas con aplicaciones en la generación y almacenamiento electroquímico de energía. Asimismo, se está trabajando para ampliar la variedad de partículas metálicas soportadas en materiales a base de grafeno con aplicación para las reacciones de reducción de oxígeno y de evolución de hidrógeno.

Sitios de interés relacionados con la UER-CICY

- <www.cicy.mx>
- <<http://www.cicy.mx/unidad-de-energia-renovable/introduccion>>
- <<http://www.cicy.mx/posgrado-en-energia-renovable/inicio>>

Catálisis en el Instituto Tecnológico de Celaya

Juan C. Fierro-González*

RESUMEN: En este trabajo se presenta de manera general la investigación que lleva a cabo el Grupo de Catálisis Heterogénea del Departamento de Ingeniería Química del Instituto Tecnológico de Celaya (ITC). Se describen brevemente algunos proyectos realizados recientemente y se hace énfasis en la aproximación que el grupo utiliza para avanzar hacia la comprensión del funcionamiento de catalizadores de metales soportados. Se discuten también las perspectivas del grupo y su intención de aprovechar las oportunidades de colaboración dentro y fuera del Departamento de Ingeniería Química del ITC.

PALABRAS CLAVE: ITC, catálisis heterogénea, metales soportados, espectroscopia.

ABSTRACT: This paper describes the research conducted by the Heterogeneous Catalysis Research group of the Department of Chemical Engineering at the Instituto Tecnológico de Celaya (ITC). Recent examples of some research projects are discussed, with emphasis on the scientific approach that the group uses to advance on the understanding of supported metal catalysts. The outlook of the research group is also explained, including the opportunities to collaborate with other research groups.

KEYWORDS: ITC, heterogeneous catalysis, supported metals, spectroscopy.

Introducción

El Instituto Tecnológico de Celaya (ITC) fue fundado en 1958 como una institución federal adscrita a la Dirección General de Educación Superior Tecnológica (DGEST). A partir del 2014, por decreto presidencial, la DGEST se reconfiguró como un órgano desconcentrado de la Secretaría de Educación Pública y se creó el Tecnológico Nacional de México (TecNM), que en conjunto reúne a 266 instituciones en el país. El ITC cuenta con 10 departamentos académicos, que imparten 11 licenciaturas y 10 programas de posgrado. Específicamente, el Departamento de Ingeniería Química imparte los programas de licenciatura, maestría en ciencias y doctorado en ciencias en ingeniería química.

Los programas de posgrado en ciencias en ingeniería química surgieron en la década de 1980 y desde entonces han formado profesionistas altamente capacitados que laboran en la industria y en diversas instituciones de educación superior. En general, los grupos de investigación que constituyen

Recibido: 13 de febrero de 2017. Aceptado: 17 de abril de 2017.

*Departamento de Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Celaya. Av. Tecnológico y Antonio García Cubas S/N, Celaya, Gto, México. Tel. +52 (461) 611 7575.
Correspondencia: (jcfierro@iqcelaya.itc.mx).

el Departamento de Ingeniería Química del ITC están asociados a tres líneas de investigación y generación de conocimiento: a) ciencia básica en ingeniería química; b) diseño de procesos, y, c) nuevas tecnologías para el desarrollo sustentable. Actualmente, 20 profesores-investigadores son miembros del consejo de posgrado del departamento, de los cuales el 70% pertenece al Sistema Nacional de Investigadores.

La investigación en el área de catálisis en el ITC es relativamente reciente, pues el Grupo de Catálisis Heterogénea (GCH) se estableció a partir de 2006. En ese momento, un objetivo del posgrado en ciencias en ingeniería química fue el de iniciar actividades de investigación en materiales avanzados. Así, en 2007 y 2008, respectivamente, se establecieron los grupos de Polímeros Nanocompuestos y Biopolímeros. En 2009 se formó el Cuerpo Académico de Química de Nanomateriales, y en 2013 el de Ciencia, Innovación y Tecnología de Polímeros. Recientemente, mediante la convocatoria de Cátedras para Jóvenes Investigadores se logró la adición de una nueva investigadora, encargada del Grupo de Nanomateriales. En paralelo con la incorporación de investigadores en el área de materiales se creó un Módulo de Especialidad en Materiales, el cual se ofrece a estudiantes de licenciatura en ingeniería química. Una de las asignaturas de dicho módulo es catálisis.

Aproximación filosófica del Grupo de Catálisis del ITC

El Grupo de Catálisis Heterogénea del ITC está interesado en la comprensión del funcionamiento de catalizadores de metales soportados en reacciones químicas con relevancia ambiental y/o tecnológica. Este interés se basa en la hipótesis de que el potencial de desarrollar mejores catalizadores para reacciones específicas está fuertemente asociado con la comprensión de su funcionamiento. Es decir, para diseñar mejores catalizadores se requiere entender primero el modo en que operan.

La estrategia utilizada para estudiar catalizadores en el grupo está enfocada en tres ejes: a) sintetizar catalizadores con estructuras lo suficientemente simples y uniformes para ser caracterizadas a detalle; b) investigar la estructura de los catalizadores en condiciones de reacción (i.e., caracterización *in situ*), y, c) estudiar reacciones que involucren moléculas estructuralmente simples.

Síntesis de catalizadores con estructuras simples

La síntesis de estructuras catalíticas simples y uniformes se refiere al uso de métodos que den lugar a la formación de nanopartículas y complejos de metales de transición dispersos de manera uniforme sobre la superficie de óxidos metálicos. Para alcanzar ese objetivo, el grupo ha utilizado compuestos organometálicos como precursores del metal a soportar [1-3]. Una ventaja de utilizar estos precursores (con respecto a sales inorgánicas normalmente em-

pleadas) radica en que sus moléculas contienen enlaces covalentes metal-carbono, relativamente fáciles de romper a bajas temperaturas. De ese modo, es posible evitar la agregación excesiva del metal soportado (sinterización) y favorecer la presencia de nanopartículas del metal con diámetros promedio (en algunos casos) menores a 3 nm. Mediante esta estrategia, el grupo ha sido capaz de sintetizar catalizadores de nanopartículas de varios metales (e.g., Au, Rh, Ru, Ni, Pt) soportadas en óxidos metálicos (e.g., TiO_2 , $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, ZrO_2). Además, la química en solución de muchos compuestos organometálicos es bien conocida. Particularmente, debido a que las reacciones que experimentan en medio ácido o básico han sido establecidas, pueden aprovecharse las propiedades ácido/base de algunos óxidos metálicos para favorecer de manera selectiva el modo en que compuestos organometálicos reaccionan en sus superficies. Esta aproximación le ha permitido al grupo trasladar la química de algunos complejos organometálicos en solución a química de superficies. En algunos casos ha sido incluso posible preparar catalizadores sólidos que contienen complejos organometálicos mononucleares bien dispersos en las superficies de óxidos metálicos. Estos materiales pueden concebirse como estructuras cuasimoleculares análogas a las de complejos organometálicos catalíticamente activos en solución. Una potencial implicación de esta analogía es que estos materiales proporcionan la oportunidad de realizar de manera heterogénea reacciones que hasta el momento únicamente se han estudiado en procesos homogéneos [1, 2].

Caracterización de catalizadores en condiciones de reacción

Comprender el funcionamiento de un catalizador implica contar con evidencia de los sitios en los que los reactivos se “activan” y se transforman en productos. Implica también tener información sobre la estructura de los intermediarios que participan en el mecanismo de reacción. Así pues, al estudiar la estructura de catalizadores de metales soportados no únicamente debe considerarse el tamaño de las partículas del metal o su estado de oxidación, sino que deben también incluirse detalles sobre la interface entre el metal y el soporte, la naturaleza de las especies adsorbidas derivadas de reactivos y los lugares específicos en los que estas especies se encuentran. Una aproximación para obtener esta información consiste en utilizar técnicas espectroscópicas que permitan estudiar los catalizadores en condiciones reactivas. El Grupo de Catálisis Heterogénea del ITC está especialmente enfocado en utilizar espectroscopías de absorción infrarrojo (IR), ultravioleta-visible (UV-vis) y rayos-X (XAFS, por su acrónimo en inglés) *in situ*. Cada una de las técnicas proporciona información estructural específica (tabla 1) que puede complementarse para entender el funcionamiento de los catalizadores. Es importante resaltar que todas esas técnicas proporcionan información sobre el promedio de la estructura de los catalizadores. Por ello, entre más uniforme sea un catalizador, más incisivos serán los datos espectroscópicos que lo caractericen. Como consecuencia, es sumamente relevante contar con catali-

TÉCNICA ESPECTROSCÓPICA	TIPO DE INFORMACIÓN	INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL DE LA INFORMACIÓN
Infrarrojo (IR)	<ul style="list-style-type: none"> – Vibraciones de enlaces de grupos orgánicos. 	<ul style="list-style-type: none"> – Distinción de especies orgánicas adsorbidas, – Naturaleza de sitios en los que moléculas se encuentran adsorbidas (con moléculas de prueba, como CO, piridina y otros), – Identificación de posibles intermediarios de reacción,
Ultravioleta-visible (UV-vis)	<ul style="list-style-type: none"> – Transiciones electrónicas de electrones externos. – Resonancias de plasmones superficiales de nanopartículas. 	<ul style="list-style-type: none"> – Tamaño de nanopartículas de algunos metales, – Ligandos de complejos organometálicos soportados,
Absorción de rayos-X (XAFS)	<ul style="list-style-type: none"> – Números de coordinación metal-metal y metal-X (X-átomos como O, C, N, etc.) (EXAFS). – Distancias interatómicas (EXAFS). – Ambiente electrónico local de metales soportados (XANES), 	<ul style="list-style-type: none"> – Tamaño de nanopartículas soportadas. – Seguimiento de rompimiento y formación de enlaces entre metal y especies adsorbidas. – Seguimiento de agregación y/o fragmentación de nanopartículas soportadas. – Detalles sobre interface metal-soporte.

TABLA 1. Información estructural obtenida por algunas técnicas espectroscópicas durante la caracterización *in situ* de catalizadores.

zadores estructuralmente simples y uniformes, pues con ellos existe una mayor oportunidad de avanzar hacia su comprensión.

En la figura 1 se muestran imágenes de celdas empleadas por el grupo para la caracterización de catalizadores en condiciones de reacción mediante espectroscopías IR, UV-vis y XAFS.

Estudio de reacciones con moléculas simples

En principio, si una reacción involucra reactivos y productos con moléculas simples, se espera que sus intermediarios también lo sean. Como el grupo estudia la estructura de los catalizadores en condiciones de reacción, se pri-

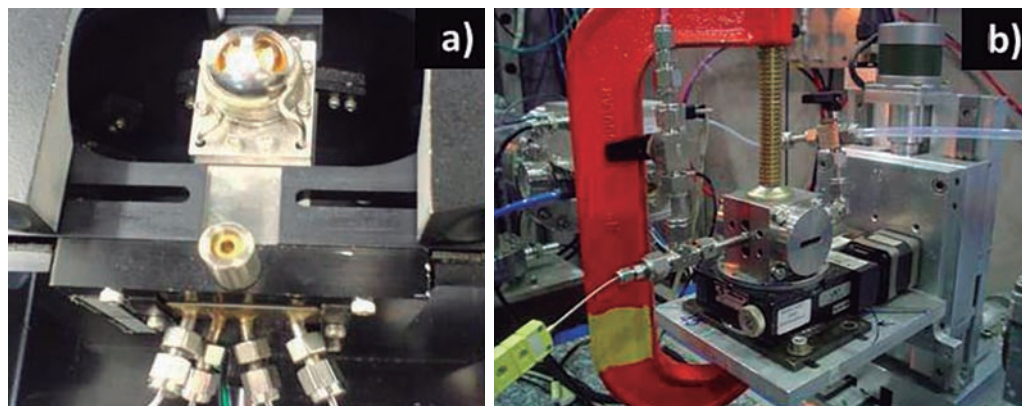


FIGURA 1. a) Celda de reflectancia difusa utilizada para la caracterización de catalizadores en condiciones reactivas mediante espectroscopías IR y UV-vis; b) celda de transmisión usada para la caracterización *in situ* de catalizadores mediante espectroscopía XAFS.

vilegia la investigación de reacciones modelo. Algunas de las reacciones que se han estudiado son la oxidación de monóxido de carbono [4], la deshidrogenación selectiva de alcoholes de bajo peso molecular (e.g., metanol, etanol, 2-propanol) [5–8], las carbonilaciones de metanol y dimetil éter [1,2], y la hidrogenación de dióxido de carbono [9], entre otras [10]. La elección de estas reacciones no obedece únicamente a la simplicidad de las moléculas que involucran, sino que además existen intereses tecnológicos y/o ambientales por desarrollar mejores catalizadores para llevarlas a cabo. Por ejemplo, en las últimas décadas ha aumentado notablemente la investigación orientada a la transformación del dióxido (CO₂) de carbono en productos de valor agregado. Sin embargo, la estabilidad de este compuesto da lugar a retos sustanciales para cuya solución probablemente la catálisis heterogénea jugará un rol preponderante en los próximos años. Por ello, hay una motivación por entender el modo en que catalizadores de nanopartículas y complejos de metales soportados pueden activar el CO₂ y favorecer sus transformaciones.

Proyectos de investigación recientes

Oxidación de monóxido de carbono

El grupo ha sintetizado exitosamente una familia de catalizadores de nanopartículas de oro soportadas en varios óxidos metálicos, que incluyen γ -Al₂O₃, TiO₂ y Fe₂O₃. Los estudios se han enfocado en la identificación de especies adsorbidas durante la reacción con la intención de distinguir cuáles de ellas son realmente intermediarios y cuáles son espectadores [4]. Específicamente, se ha investigado la naturaleza de los sitios sobre los que el monóxido de carbono (CO) y el oxígeno se activan. Los resultados son consis-

tentes con la idea de que el CO se activa en la superficie de las nanopartículas de oro. En la mayoría de los casos, nuestros datos sugieren que el oro catiónico es más activo que el oro reducido. No obstante, cuando el oro está soportado en TiO_2 , los resultados sugieren que la presencia de Au^0 es indispensable en los catalizadores. Las observaciones de otros autores coinciden con las conclusiones de nuestro grupo [11-13], pero aún existe un debate sobre la razón por la cual la activación de CO aparentemente ocurre en sitios de oro con distintos estados de oxidación dependiendo de la naturaleza del soporte en el que se encuentran las nanopartículas.

De manera similar, nuestros estudios sobre activación de oxígeno sugieren que esta molécula se activa en sitios del soporte sólo cuando el óxido es reducible (e.g., TiO_2 , Fe_2O_3), mientras que en óxidos no reducibles (e.g., $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, SiO_2) la activación ocurre en la interface entre el oro y el soporte [14]. Al igual que con la activación del CO, no se ha conseguido elucidar por qué razón la naturaleza del soporte afecta de tal modo la activación del oxígeno en catalizadores de oro soportado. Sin embargo, el conjunto de resultados indica que existen múltiples maneras en las que la oxidación de CO puede ocurrir sobre estos materiales. Este último aspecto podría explicar, en parte, el intenso debate que existe en la literatura sobre la inesperada actividad catalítica del oro.

Oxidación y deshidrogenación selectiva de alcoholes y aminas

La oxidación selectiva de alcoholes es una ruta para la producción de cetonas y aldehídos. Sin embargo, el uso de agentes oxidantes como permanganato de potasio y dicromato de sodio da lugar a la formación estequiométrica de productos secundarios no deseados, como óxidos de manganeso y cromo, respectivamente. Por ello, desde hace varias décadas ha existido el interés de utilizar oxígeno como agente oxidante de alcoholes, y se ha buscado desarrollar catalizadores que sean lo suficientemente activos y selectivos para obtener aldehídos y cetonas por esta ruta de manera rentable. Aunque existe prácticamente un consenso en la literatura sobre el hecho de que la oxidación de alcoholes ocurre por una ruta deshidrogenativa, en la que el paso determinante de la velocidad de reacción consiste en el rompimiento del enlace $\beta(\text{C-H})$ del alcohol, la naturaleza de los sitios superficiales que participan en la reacción y la identidad de los intermediarios son aún un misterio [15]. El Grupo de Catálisis Heterogénea del ITC ha investigado las reacciones de oxidación y deshidrogenación de etanol y 2-propanol catalizadas por nanopartículas de oro soportadas en $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ y TiO_2 [5-8]. Además, recientemente ha comenzado a estudiar la influencia de la morfología del soporte en la actividad de catalizadores de nanopartículas y complejos mononucleares de Pt soportados en TiO_2 y nanotubos de TiO_2 . Los resultados obtenidos por el grupo sugieren que los catalizadores son bifuncionales, con los soportes sirviendo como sitios de activación de los alcoholes y las partículas soportadas proporcionando sitios para recombinación de hidrógeno. Estudios re-

cientes en los que se midieron espectros IR de catalizadores de oro soportado en TiO_2 mientras se trataban en etanol isotópicamente etiquetado (i.e., $\text{CH}_3\text{CD}_2\text{OH}$) permitieron proponer que el transporte de hidrógeno desde especies del alcohol activado en forma de etóxido en el soporte hacia las partículas de oro ocurre por un proceso de *reverse spillover* [8]. Esos resultados podrían ser útiles para elucidar la química de oxidación de alcoholes en catalizadores de metales soportados y sirven como base para explorar si otras moléculas orgánicas se oxidan (o se deshidrogenan) por rutas similares. Por ejemplo, el grupo ha encontrado que la deshidrogenación de dietilamina en catalizadores de oro soportado en TiO_2 ocurre por una ruta similar a la deshidrogenación del etanol, con la amina adsorbiéndose en sitios del soporte y el oro proporcionando sitios para la sustracción y recombinación de H_2 [10]. El uso de espectroscopías IR y XAFS ha ayudado a proponer la presencia de especies que podrían ser consideradas como intermediarias de reacción.

Reacciones de carbonilación

El grupo ha utilizado complejos mononucleares de rodio soportados en TiO_2 como catalizadores en las carbonilaciones de metanol y dimetil éter [1, 2]. Se sabe que complejos mononucleares de rodio en solución son altamente activos para la producción de ácido acético y acetato de metilo a partir de la carbonilación de metanol (proceso Monsanto). El objetivo del proyecto del Grupo de Catálisis Heterogénea del ITC fue explorar la posibilidad de sintetizar catalizadores sólidos que fueran tan activos y selectivos como las moléculas en solución, pero que además pudieran llevar a cabo la reacción de manera heterogénea (evitando con ello los problemas clásicos de recuperación del catalizador en procesos homogéneos). Utilizando el complejo $\text{Rh}_6(\text{CO})_{16}$ como precursor, fue posible preparar dicarbonilos de rodio anclados a la superficie del TiO_2 a través de dos enlaces $\text{Rh}-\text{O}$ [1]. Estructuralmente, estos complejos soportados son similares a los dicarbonilos de Rh usados en el proceso Monsanto. Más aún, el catalizador sólido es activo y selectivo hacia la producción de acetato de metilo a partir de las carbonilaciones de metanol y dimetil éter a presión atmosférica y temperaturas menores a 300°C . Estudios de espectroscopía IR *in situ* permitieron además establecer el modo en que los complejos soportados catalizan las carbonilaciones. Particularmente, se encontró evidencia de tres tipos de especies metóxido enlazadas al catalizador durante la adsorción de metanol o de dimetil éter sobre las muestras: especies linealmente, doblemente y triplemente enlazadas a sitios de Ti^{4+} . Sin embargo, los resultados demostraron que únicamente los metóxidos linealmente enlazados participan en las reacciones de carbonilación [1]. Se encontró que el modo en que dichas especies se transforman a acetato de metilo es análogo al observado en complejos en solución. Esos resultados refuerzan la idea de que es posible trasladar la química conocida en soluciones para entender procesos catalíticos superficiales.

Hidrogenación de CO₂

El incremento del uso de combustibles fósiles ha dado lugar a un aumento en las emisiones de CO₂. Debido a que éste es un gas de efecto invernadero (con potencial contribución al cambio climático global), existe un gran interés por impedir su acumulación atmosférica. Una de las estrategias más estudiadas para resolver este problema consiste en buscar la manera de transformar el CO₂ en otros compuestos [16]. Sin embargo, la alta estabilidad del CO₂ impone retos importantes, mismos que podrían ser abordados mediante la búsqueda de catalizadores capaces de convertir el CO₂ en otros compuestos a velocidades de reacción significativas. Entre las reacciones del CO₂, aquellas con H₂ han sido las más estudiadas. Se ha encontrado que a partir de la hidrogenación de CO₂ puede obtenerse una variedad de productos, como metano, metanol y dimetil éter, entre otros. En el GCH del ITC se ha explorado la hidrogenación de CO₂ para producir metano (i.e., metanación de CO₂). Esta reacción ocurre a presión atmosférica y a temperaturas relativamente bajas con respecto a otras hidrogenaciones. También se han preparado nanopartículas de níquel soportadas en ZrO₂ que son altamente activas y selectivas hacia la metanación de CO₂. Estudios de espectroscopía IR *in situ* permitieron establecer que el modo en que el CO₂ es activo es mediante su adsorción en la superficie del soporte como especies formiato. Dichas especies son hidrogenadas para producir grupos metóxido, que pueden ser nuevamente hidrogenados para dar lugar al metano. La caracterización espectroscópica en tiempo real fue útil para hallar evidencia física directa de varias especies que podrían considerarse como intermediarias de reacción [9].

En un estudio paralelo, el grupo también ha investigado la metanación de CO₂ catalizada por complejos de organorrutenio soportados en γ -Al₂O₃. Se consiguió preparar complejos con estructuras cuasimoleculares enlazadas a la superficie del soporte y se encontró que algunas de ellas son activas para la reacción. Mediante la combinación de espectroscopías IR y XAFS se determinó que en estos catalizadores el CO₂ es activado en forma de CO enlazado al rutenio y no se encontró evidencia de que especies formiato participen directamente en la reacción. Estos resultados indican que la activación del CO₂ en catalizadores de metales soportados depende fuertemente de la combinación metal-soporte, de la estructura de las muestras y de las condiciones de reacción. Nuevamente, la síntesis de catalizadores con estructuras simples y el uso de técnicas de caracterización en condiciones de reacción permitieron buscar correlaciones entre la estructura y el funcionamiento de los catalizadores.

Infraestructura disponible para la realización de actividades de investigación en catálisis

En el Laboratorio de Catálisis Heterogénea se cuenta con los siguientes equipos:

- Espectrofotómetro FTIR (Thermo Scientific) con celda ambiental para mediciones en condiciones de reacción.
- Espectrofotómetro UV-vis (Thermo Scientific) con celda ambiental para mediciones en condiciones de reacción.
- Espectrómetro de masas (Balzers Omnistar).
- Cromatógrafo de gases con detectores de conductividad térmica y de ionización de flama (SRI-8610).
- Equipo de quimisorción, fisisorción de nitrógeno y para caracterización de catalizadores por técnicas a temperatura programada (ChemBET, Quantachrome).
- Cámara anaerobia para síntesis de catalizadores (Labconco).
- Sistema de reacción con reactor de lecho fijo para prueba de catalizadores.

En la figura 2 se muestran fotografías de algunos de los equipos del laboratorio. Además, el grupo ha sido usuario desde 2006 del Laboratorio Nacional de Luz Sincrotrón (LNLS) en Campinas, Brasil, donde realiza experimentos de espectroscopía XAFS en condiciones de reacción (figura 3). Los datos obtenidos en el LNLS complementan aquéllos que se miden en nuestro laboratorio.

FIGURA 2. Algunos equipos del GCH del ITC: a) cámara anaerobia; b) espectrofotómetro IR; c) horno tubular para pruebas catalíticas; d) espectrómetro de masas.



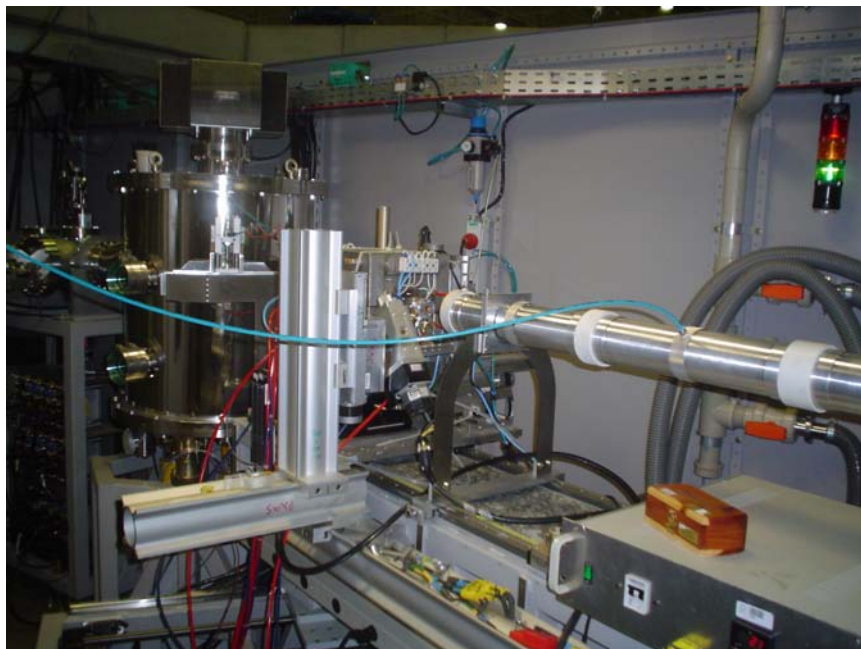


FIGURA 3. Vista interior de la línea de XAFS dispersivos del Laboratorio Nacional de Luz Sincrotrón en Campinas, Brasil.

Grupos de investigación de diversas instituciones del país, como la UAM, UASLP, UAS y UANL han realizado visitas para caracterizar sus catalizadores en nuestro laboratorio por medio de espectroscopías IR y UV-vis *in situ*. De manera similar, nuestros estudiantes también caracterizan sus muestras en laboratorios de esas mismas instituciones, donde tienen acceso a técnicas que no están disponibles en el ITC. Específicamente, espectroscopía Raman y microscopía de transmisión electrónica.

Perspectivas del grupo de catálisis

Históricamente, las diversas áreas de catálisis (homogénea, heterogénea, fotocatalisis, enzimática, electrocatálisis) habían sido estudiadas desde enfoques muy específicos e independientes. No obstante, en los últimos años hemos sido testigos de notables avances en métodos de síntesis de materiales y en las técnicas disponibles para su caracterización. Estos avances han dado lugar al planteamiento de preguntas científicas sobre el funcionamiento de los catalizadores sólidos que de ser respondidas resolverían problemas no sólo de catálisis heterogénea, sino también de los otros tipos de catálisis. Comprender de manera rigurosa el funcionamiento de un catalizador (sea éste un sólido, una pequeña molécula en solución o una enzima) implica con-

tar con información precisa sobre el rompimiento y formación de enlaces que dan lugar a la reacción que se estudia. Existe entonces un lenguaje común entre todas las áreas de la catálisis: la química. Estudiar química catalítica en los próximos años requerirá de un mayor control en la síntesis de materiales catalíticos y de un aumento en la sensibilidad y resolución de tiempo de las técnicas empleadas para su caracterización.

Ante este panorama, el Grupo de Catálisis Heterogénea del ITC planea continuar reforzando sus colaboraciones dentro y fuera del Departamento de Ingeniería Química con grupos orientados a la síntesis de materiales avanzados para aprovechar su experiencia en la síntesis de óxidos con morfologías específicas y bien definidas. Nuestra intención es utilizar algunos de estos materiales como soportes o directamente como catalizadores, siempre estudiando en tiempo real el modo en que funcionan. Algunos ejemplos incluyen estructuras de óxido de grafeno y *metal-organic frameworks*. Al mismo tiempo, continuaremos aprovechando la posibilidad de realizar mediciones en laboratorios de luz sincrotrón, cuyas instalaciones son actualizadas frecuentemente y permiten abordar problemas cada vez más complejos.

Referencias

- [1] Flores-Escamilla, G. A. y Fierro-Gonzalez, J. C. (2012). Participation of linear methoxy species bonded to Ti^{4+} sites in methanol carbonylation catalyzed by TiO_2 -supported rhodium: An infrared investigation. *J. Mol. Catal. A* 359: 49-56.
- [2] Flores-Escamilla, G. A. y Fierro-Gonzalez, J. C. (2015). Infrared spectroscopic study of dimethyl ether carbonylation catalysed by TiO_2 -supported rhodium carbonyls. *Catal. Sci. & Technol.* 5: 843-850.
- [3] Fierro-Gonzalez, J. C., Kuba, S., Hao, Y., Gates, B. C. (2006). Oxide- and zeolite-supported molecular metal complexes and clusters: Physical characterization and determination of structure, bonding, and metal oxidation state. *J. Phys. Chem. B.* 110: 13326-13351.
- [4] Jiménez-Lam, S. A., Martínez-Ramírez, Z., Santos-López, I. A., Handy, B. E., Cárdenas-Galindo, M. G., Fierro-Gonzalez, J. C. (2012). Role of iron carbonyls in the inhibition of oxygen activation for the oxidation of CO catalyzed by iron oxide-supported gold. *ChemPhysChem.* 13: 4173-4179.
- [5] Martínez-Ramírez, Z., Jiménez-Lam, S. A. (2011). Infrared spectroscopic evidence of adsorbed species during the oxidation of 2-propanol catalyzed by $\gamma-Al_2O_3$ -supported gold: Role of gold as a hydrogen-subtractor. *J. Mol. Catal. A* 344: 47-52.
- [6] Martínez-Ramírez, Z., González-Calderón, J. A., Almendarez-Camarillo, A., Fierro-Gonzalez, J. C. (2012). Adsorption and dehydrogenation of 2-propanol on the surface of $\gamma-Al_2O_3$ -supported gold. *Surf. Sci.* 606: 1167-1172.
- [7] González-Yañez, E. O., Fuentes, G. A., Hernández-Terán, M. E., Fierro-González, J. C. (2013). Influence of supported gold particles on the surface reactions of ethanol on TiO_2 . *Appl. Catal. A* 464-465: 374-383.

- [8] Cornejo-Romero, J., Solís-García, A., Vega-Díaz, S. M., Fierro-González, J. C. (2017). Reverse hydrogen spillover during ethanol dehydrogenation on TiO_2 -supported gold catalysts. *Mol. Catal.* 433: 391-402.
- [9] Solís-García, A., Louvier-Hernández, J. F., Almendarez-Camarillo, A., Fierro-Gonzalez, J. C. (2017). Participation of surface bicarbonate, formate and methoxy species in the carbon dioxide methanation catalyzed by ZrO_2 -supported Ni. *submitted*.
- [10] Sarmiento-López, A., Berumen-España, G., López-Serrano, C., Fierro-González, J. C. (2016). Influence of supported gold particles on the surface reactions of diethylamine on TiO_2 . *Surf. Sci.* 653: 197-204.
- [11] Min, B. K. y Friend, C. M. (2007). Heterogeneous gold-based catalysis for green chemistry: Low temperature CO oxidation and propene oxidation. *Chem. Rev.* 107: 2709-2724.
- [12] Li, Z.-Y., Yuan, Z., Li, X.-N., Zhao, Y.-X., He, S.-G. (2014). CO oxidation catalyzed by single gold atoms supported on aluminum oxide clusters. *J. Am. Chem. Soc.* 136: 14307-14313.
- [13] Herzing, A. A., Kiely, C. J., Carley, A. F., Landon, P., Hutchings, G. J. (2008). Identification of active gold nanoclusters on iron oxide supports for CO oxidation. *Science*, 321: 1331-1335.
- [14] Jiménez-Lam, S. A., Cárdenas-Galindo, M. G., Handy, B. E., Gomez, S. A., Fuentes, G. A., Fierro-Gonzalez, J. C. (2011). Influence of supported gold on the dynamics of reduction and crystallization of iron oxides: A dispersive X-ray absorption near edge structure spectroscopy and X-ray diffraction study. *J. Phys. Chem. C.* 115: 23519-23526.
- [15] Mallat, T. y Baiker, A. (2004). Oxidation of alcohols with molecular oxygen on solid catalysts. *Chem. Rev.* 104: 3037-3058.
- [16] Wang, W.-H., Himeda, Y., Muckerman, J. T., Manbeck, G. F., Fujita, E. (2015). CO_2 hydrogenation to formate and methanol as an alternative to photo- and electrochemical CO_2 reduction. *Chem. Rev.* 115: 12936-12973.

Investigación y desarrollo en catálisis en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares*

Luis Escobar Alarcón,** Suilma Marisela Fernández Valverde,***
Jaime Jiménez Becerril,*** Régulo López Callejas,**
Raúl Valencia Alvarado,** Raúl Pérez Hernández****

RESUMEN: Se describen las actividades de investigación en el área de catálisis que se realizan en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) y se refieren las atribuciones que por mandato legal tiene el Instituto. Se incluyen las líneas de investigación, contribuciones y los principales logros en este campo obtenidos a través de los años. También se presenta información sobre la infraestructura con que cuenta el Instituto para llevar a cabo investigación sobre catálisis. Se menciona la importancia del trabajo de colaboración nacional e internacional, así como la formación de recursos humanos. Por último, se presentan las perspectivas de investigación y desarrollo en nuestra institución en el campo de la catálisis.

PALABRAS CLAVE: Catálisis, nanocatálisis, electrocatálisis, fotocatalisis, radiocatálisis, nanomateriales, energía, ambiente.

ABSTRACT: This manuscript shows the activities in the catalysis field performed in the National Institute of Nuclear Research (Spanish acronym: ININ), and briefly are included the goals and attributions that by legal mandate has the Institute. It includes research lines, contributions, and main achievements in this field obtained through the years. In addition, information about the infrastructure available in the Institute to perform the research on catalysis is presented. The importance of the national and international collaborations, as well as, the projects in this area, and human resources training are emphasized. Finally, we present the research and development prospects on catalysis in our Institution in the catalysis field.

KEYWORDS: Catalysis, nanocatalysis, electrocatalysis, photocatalysis, radiocatalysis, nanomaterials, energy, environment.

Introducción

El Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) es un organismo descentralizado del gobierno federal, dependiente de la Secretaría de Energía (SENER). Fue creado mediante la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear, que en el capítulo V, artículo 43, establece que

Recibido: 23 de enero de 2017. Aceptado: 31 de marzo de 2017.

* Agradecemos a *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología* el permitirnos difundir las actividades en catálisis que desarrolla el ININ.

** Departamento de Física. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), carretera México-Toluca s/n, La Marquesa, C.P. 52750, Ocoyoacac, Edo. de México, México.

*** Departamento de Química, ININ.

**** Departamento de Tecnología de Materiales, ININ.

Correspondencia: (raul.perez@inin.gob.mx).



FIGURA 1. Vista panorámica (izq.) y mural (dcha.): “La creación de la energía”, de Francisco Eppens, en el edificio del reactor nuclear TRIGA del Centro Nuclear.

para el cumplimiento de su objeto, el ININ tendrá, entre otras atribuciones, las siguientes: realizar e impulsar las actividades que conduzcan al desarrollo científico y tecnológico en el campo de las ciencias y tecnologías nucleares, así como promover la transferencia, adaptación y asimilación en esta materia; prestar asistencia técnica a las dependencias y entidades públicas y privadas que lo requieran, en el diseño, construcción y operación de instalaciones radiactivas; realizar actividades de investigación y desarrollo relativas a las aplicaciones y aprovechamiento de sistemas nucleares y materiales radiactivos para usos no energéticos requeridos para el desarrollo nacional; además, promoverá las aplicaciones de las radiaciones y los radioisótopos en sus diversos campos.

Las líneas de investigación que el ININ tiene para cumplir tal propósito, aprobadas por su Órgano de Gobierno, son: aplicaciones de las radiaciones a los sectores industrial, salud y agropecuario, aplicaciones de los aceleradores de partículas, ciencias nucleares, ecología y protección del medio ambiente, fuentes energéticas, gestión de desechos radiactivos, materiales nucleares y radiactivos, química y radioquímica, radiobiología y genética, seguridad nuclear y radiológica, tecnología de reactores nucleares. En el marco de estas líneas de investigación y buscando impulsar la incursión en temas emergentes, con el propósito de aprovechar las oportunidades coyunturales que representan y que abren nuevos espacios para el progreso y bienestar social, en línea con el Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación (PE-CITI) 2014-2018, que se desprende del objetivo 3.5 del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018, que a la letra dice: “Hacer del desarrollo científico, tecnológico y la innovación pilares para el progreso económico y social sostenible”, el propósito de los objetivos rectores del PECITI es guiar en la

transición del país hacia una economía basada en el conocimiento. En particular, los temas prioritarios y de competencia para el ININ serían:

- Ambiente: gestión integral del agua, seguridad hídrica y derecho al agua.
- Conocimiento del Universo: estudios de física, matemáticas, química y sus aplicaciones.
- Desarrollo tecnológico: desarrollo de materiales avanzados y desarrollo de nanomateriales y de nanotecnología
- Energía: desarrollo y aprovechamiento de energías renovables y limpias.

En el ININ se realizan proyectos de investigación con el objetivo de desarrollar nuevos nanomateriales con aplicaciones catalíticas para la generación de combustibles alternos al petróleo y para la eliminación de contaminantes orgánicos recalcitrantes presentes en el agua mediante procesos de oxidación avanzada. En el primer caso, se desarrollan proyectos de investigación para atacar uno de los problemas ocasionados por nuestra dependencia del petróleo; una de las perspectivas y estrategias a seguir para la solución de estos problemas está encaminada hacia un sistema energético basado en el hidrógeno (H_2), el cual es considerado como el combustible del futuro o la “economía del hidrógeno”. El H_2 proveerá a la humanidad de un recurso energético eficaz y mucho más limpio, que asegure su continuo y futuro desarrollo. El proceso más aceptado para la obtención del H_2 es el reformado del bioalcoholes (metanol, etanol) y metano proveniente del biogás, en presencia de catalizadores o electrocatalizadores apropiados, en estos casos el CO_2 emitido está considerado dentro del ciclo del carbono. El hidrógeno generado puede ser utilizado como fuente de energía en las celdas de combustible (*FC-fuel cell*) donde los únicos subproductos son agua y calor. La otra vertiente de estudio en el ININ, asociada con el crecimiento poblacional, industrial y la demanda de servicios, está relacionada con la contaminación del agua con compuestos orgánicos, altamente tóxicos, químicamente estables y persistentes, con efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente. En particular, en los últimos años ha crecido el interés en los denominados “contaminantes emergentes” que se encuentran presentes en aguas residuales, así como en aguas superficiales e incluso potable; estos contaminantes tienen su origen en diversas sustancias de uso cotidiano como son: fármacos, de cuidado personal e incluso hormonas. Es importante señalar que las plantas de tratamiento de aguas residuales no están diseñadas para remover sustancias complejas de este tipo. Por tal motivo, se hace necesaria la búsqueda de métodos eficaces para la eliminación de estos contaminantes presentes en medio acuoso. Una alternativa es el uso de los procesos de oxidación avanzada (POA), que parten de procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios significativos en la estructura del contaminante logrando su degradación parcial o completa. Dentro

de estos procesos se encuentra la fotocatalisis heterogénea, considerada como una tecnología promisoría, eficiente y limpia, que se define como “el cambio en la velocidad de una reacción química o su iniciación debido a la exposición a la radiación ultravioleta, visible o infrarroja en presencia de una sustancia, el fotocatalizador, que absorbe cuantos de luz y participa en la transformación química de los participantes de la reacción”. La fotocatalisis se basa en el uso de radiación electromagnética que incide sobre un material sólido, generalmente un semiconductor, capaz de absorber radiación con energía igual o mayor a la de su energía de banda prohibida, generando especies oxidantes, que permiten la degradación parcial o completa de contaminantes hasta llevarlos a la mineralización total, transformándolos en CO_2 y H_2O . Las reacciones catalizadas inducidas por radiaciones ionizantes o radiocatalisis, es un proceso que combina en sí mismo varias reacciones radiocatalíticas que no están entendidas del todo, por lo que se encuentran en la etapa de investigación.

A través del trabajo de investigación realizado en el ININ, se pretende contribuir con alternativas que permitan eventualmente la mitigación de los problemas de contaminación ambiental; por un lado, mediante el desarrollo de nanocatalizadores para la producción y uso del hidrógeno como fuente alternativa de energía limpia y, por el otro, desarrollando nanomateriales para la degradación de contaminantes presentes en el agua mediante POA utilizando luz solar; de esta forma, se promueve la cultura de desarrollo sustentable en materia de energía y ambiente.

Líneas de investigación, desarrollo e innovación relacionadas con la catálisis

Debido a la creciente necesidad de contar con desarrollos y energías sustentables, varios países incluyendo México pretenden disminuir sus emisiones contaminantes en los próximos años mediante el uso de biocombustibles, como se menciona en la Estrategia Nacional de Energía 2013-2027 a cargo de la Secretaría de Energía. En este contexto, un paso natural es buscar soluciones con los avances más recientes en ciencia, en particular, en la nanotecnología, disciplina que ofrece la posibilidad de desarrollar nuevos nanomateriales con estructuras preformadas (en forma de nanopartículas, nanorrodillos, nanotubos y nanohojas); es importante señalar que este tipo de nanocatalizadores no están siendo utilizados para la generación de H_2 que puede ser empleado para generar energía limpia y son poco utilizados en procesos de oxidación avanzada, lo que le confiere cierto grado de originalidad al trabajo de investigación realizado en esta dirección. En este contexto, en el ININ se desarrollan líneas de investigación en el campo de catálisis, que involucran la síntesis, caracterización y aplicaciones de nanomateriales, los denominados nanocatalizadores:

- Diseño de nanocatalizadores unidimensionales (*nanorods*) con morfologías y planos cristalográficos preferenciales para la generación de

- hidrógeno, mediante la reacción de reformado de alcoholes y CH_4 .
- Desarrollo de nanomateriales para aplicarlos en celdas de combustible para la producción de hidrógeno como fotoelectrocatalizadores y electrocatalizadores. Los primeros para electrólisis de agua utilizando la luz solar y los segundos como nanomateriales para electrodos de: celdas de combustible, celdas regenerativas unificadas y celdas de carbonatos fundidos.
 - Procesos de oxidación avanzada inducida por radiaciones modificando óxidos de titanio comerciales con metales de transición y soportados en matrices mesoporosas (MCM-41 y carbón), para la degradación de compuestos orgánicos contaminantes recalcitrantes y persistentes en efluentes acuosos, tal como residuos de la industria y plantas de tratamiento.
 - Películas de N-TiO_2 obtenidas en un reactor de plasma sobre los sustratos de vidrio o silicio y su estudio en la remoción de contaminantes tóxicos en aire y agua, así como la generación de hidrógeno por electrólisis de agua.
 - Preparación y caracterización de películas delgadas nanoestructuradas con aplicaciones fotocatalíticas.
 - Desarrollo de nanomateriales basados en TiO_2 y V_2O_5 para la degradación de moléculas orgánicas.
 - Modificación de TiO_2 y V_2O_5 con metales (Ag, Bi, Au y Zn) para la degradación fotocatalítica de fármacos utilizando radiación solar.

Síntesis de nanomateriales

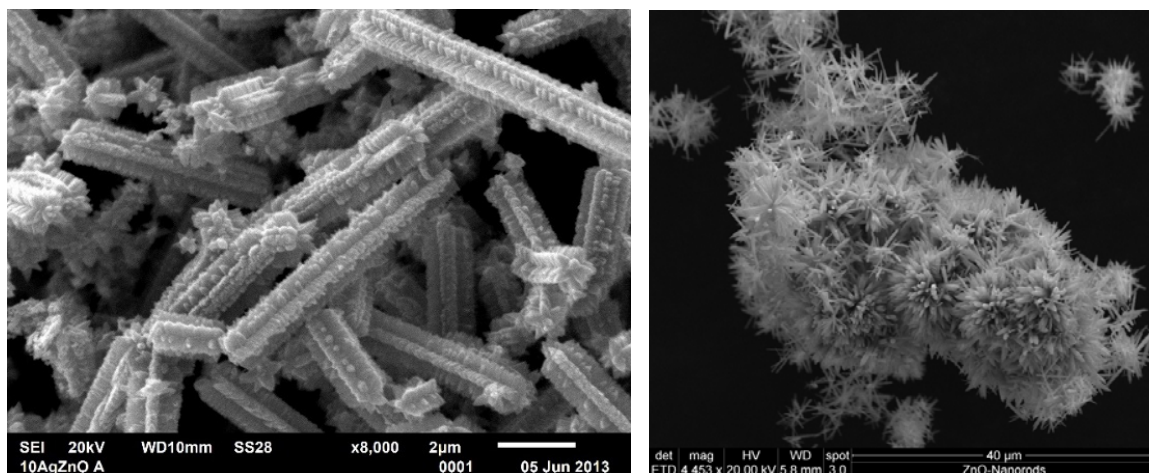
- Preparación de nanocatalizadores bimetalicos 1D utilizando el método hidrotermal e impregnación clásica.
- Síntesis de materiales por sol-gel.
- Para catálisis inducida por radiaciones se modificaron algunos óxidos de titanio comerciales con metales de transición y se han soportado en matrices mesoporosas (MCM-41 y carbón).
- Síntesis de películas de dióxido de titanio dopadas con nitrógeno (N-TiO_2) en plasmas de RF por el proceso de *sputtering* sobre sustratos de silicio y vidrio en las fases de anatasa y anatasa/rutilo.
- Preparación de nanomateriales mediante configuraciones no convencionales de ablación láser.
- Preparación de nanomateriales mediante configuraciones híbridas de ablación láser combinada con evaporación térmica y pulverización catódica.
- Preparación de nanomateriales mediante ablación láser en medio líquido.
- Preparación de nanomateriales híbridos formados por nanopartículas soportadas o embebidas en películas delgadas o en otros materiales.

- Síntesis de electrocatalizadores nanoparticulados de metales nobles: Pt, Ru, Pt-Ru obtenidos por descarboxilación de carbonilos en medio orgánico.
- Síntesis de electrocatalizadores por sol gel de aleaciones metálicas u óxidos: Pt-Ti, Pt-Ir, $Pt_xIr_yO_z$ para funcionar en medio ácido.
- Síntesis por aleado mecánico de $TiCoO_3$ de tamaño nanométrico, para reacciones de reducción y desprendimiento de oxígeno en medio alcalino.

Caracterización de nanomateriales

- Evaluación de las propiedades catalíticas de los nanocatalizadores 1D en reacciones de reformado de alcoholes y metano (CH_4).
- Reacción de electrólisis del agua siguiendo el desprendimiento de oxígeno (RDO) y reacción de desprendimiento de hidrógeno (RDH).
- Degradación de compuestos orgánicos contaminantes recalcitrantes y persistentes en efluentes acuosos por radiocatálisis.
- Caracterización de propiedades vibracionales de nanomateriales por espectroscopía infrarroja y espectroscopía Raman.
- Caracterización de propiedades ópticas mediante espectroscopía ultravioleta-visible, espectroscopía de reflectancia difusa y fotoluminiscencia.
- Caracterización morfológica, estructural y análisis químico por microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía electrónica de transmisión (TEM) y espectroscopía de dispersión de energía (EDS), respectivamente; así como microscopía de fuerza atómica (AFM).
- Estudio de la cristalinidad de polvos y películas delgadas mediante difracción de rayos X y espectroscopía Raman.

FIGURA 2. Síntesis de micro-cepillos a base de Ag-ZnO y ZnO en forma de rods.



- Caracterización de nanomateriales mediante técnicas de haces de iones como espectroscopía de retrodispersión de Rutherford (RBS), análisis por dispersión elástica hacia adelante (EFA) y reacción nuclear (NR) entre otras.
- Caracterización del desempeño fotocatalítico en la degradación de moléculas orgánicas, como pigmentos y fármacos presentes en aguas residuales reales, utilizando radiación solar.
- Caracterización de las aleaciones de Pt obtenidas en medio orgánico las cuales mostraron un buen desempeño para la reacción de reducción de oxígeno en medio ácido.
- La evaluación electrocatalítica de los óxidos de molibdeno, cobalto y las mezclas de éstos mostraron un muy buen desempeño para la reacción de desprendimiento de oxígeno en medio alcalino.
- Las propiedades electrocatalíticas de los óxidos TiCoO_3 y $\text{Pt}_x\text{Ti}_y\text{Co}_z$ presentan buena respuesta en reacciones de reducción y desprendimiento de oxígeno en medio alcalino.

Aplicaciones

- Aplicación de los catalizadores 1D desarrollados con tamaño y forma controlada en reacciones de reformado de alcoholes y biogás.
- Electrolizadores para celdas regenerativas unificadas evaluados en medio ácido y en medio básico, en colaboración con el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).
- Degradación de compuestos orgánicos contaminantes recalcitrantes y persistentes en efluentes acuosos, tales como residuos de la industria textil y plantas de tratamiento mediante fotocátalisis y radiocátalisis; así como en la generación de hidrógeno por separación de agua.
- Tratamiento de aguas residuales, en particular para la degradación de moléculas orgánicas, como pigmentos y fármacos presentes en aguas residuales reales, utilizando radiación solar.
- Aplicación de los electrocatalizadores de metales nobles en prototipos de celdas de combustible ácidas.
- Uso de los electrocatalizadores de metales de transición en celdas de combustible alcalinas.
- Aplicación de los óxidos de platino-iridio o de óxido de titanio dopado o de TiCoO_3 en celdas regenerativas unificadas.

Colaboraciones y proyectos

Los grupos de investigación en catálisis en el ININ son multidisciplinarios y han adquirido experiencia en la preparación y manipulación de diferentes nanomateriales por métodos químicos, entre ellos, el método sol-gel para la

síntesis de óxidos simples y compuestos, método hidrotermal para la obtención de óxidos unidireccionados. Se cuenta también con amplia experiencia en la preparación de películas delgadas y nanoestructuras utilizando técnicas basadas en plasmas. Adicionalmente, se tiene experiencia en la caracterización de catalizadores por técnicas físicas, químicas y nucleares. Lo anterior ha permitido establecer colaboraciones con investigadores de las siguientes instituciones:

Nacionales:

- Universidad Nacional Autónoma de México:
 - Facultad de Química.
 - Instituto de Investigaciones en Materiales.
 - Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico.
 - Centro de Nanociencias y Nanotecnología.
 - Instituto de Física.
 - Facultad de Ingeniería.
 - Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Campus-Querétaro.
- Universidad Autónoma del Estado de México:
 - Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, dependiente de la Universidad Autónoma del Estado de México y la Universidad Nacional Autónoma de México.
 - Facultad de Ciencias.
 - Facultad de Química.
- Instituto Tecnológico de Toluca.
- Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Universidad Tecnológica del Valle de Toluca.
- Universidad Autónoma Metropolitana Lerma.
- Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
- Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Universidad Autónoma de Querétaro.
- Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C. (CIDETEQ), Querétaro.
- Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo:
 - Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales.
- Centro de Investigación y Estudios Avanzados:
 - Departamento de Química-Zacatenco.
 - Grupo de sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía, Unidad Saltillo.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas (actualmente INEEL-Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias).
- Instituto Politécnico Nacional:
 - Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas.

Internacionales:

- Universidad de Texas, Campus San Antonio.
- Laboratorios de Hidrógeno y de Materiales para altas Temperaturas. Depto. de Tecnología en Calor Nuclear del Instituto de Energía Atómica de Japón.
- Escuela Nacional Superior de Química de París (École Nationale Supérieure de Chimie de Paris ENSCP-Paris-Tech).
- Universidad de Columbia Británica, Vancouver, Canadá.

Proyectos financiados por CONACyT:

- Síntesis y caracterización de electrocatalizadores bifuncionales para la reducción y desprendimiento de oxígeno y su desempeño en una celda regenerativa unificada (CB-2007-01).
- Desarrollo de catalizadores a base de Cu y Ni soportado en $\text{ZrO}_2\text{-CeO}_2$ para la generación de hidrógeno mediante la reacción de reformado de metanol con vapor de agua en atmósfera oxidante (J-023959).
- Efecto de la radiación gamma sobre la actividad fotocatalítica de óxidos de zinc y titanio (CB-83943).
- Oxidación de titanio por plasmas de radiofrecuencia inductivamente acoplados (CB-102466).
- Preparación de nanomateriales basados en TiO_2 y V_2O_5 utilizando configuraciones no convencionales de ablación láser (CB-240998).

Proyectos financiados por el ININ:

- Estudio de factibilidad del uso de nanocatalizadores bimetálicos para la producción de hidrógeno, mediante el reformado de metanol (CA-409).
- Diseño de catalizadores unidimensionales para la generación de H_2 mediante el reformado de metanol (CA-009).
- Desarrollo de catalizadores para su uso en la reducción catalítica selectiva de contaminantes atmosféricos y generadores de nuevos combustibles (CM-520).
- Estudio de las propiedades catalíticas para la eliminación de emisiones contaminantes, de metales soportados en óxidos mixtos (SC-019).
- Preparación y caracterización de películas delgadas nanoestructuradas con aplicaciones fotocatalíticas (CB-402).
- Estudio de materiales con propiedades fotocatalíticas con posible aplicación en la degradación de resinas de intercambio iónico (CB-407).
- Estudio de la degradación de residuos industriales de ensayos no destructivos por radiocatálisis (CB-504).
- Hidrógeno y materiales funcionales para celdas de combustible y re-

- generativas (CB-906).
- Prueba de materiales para la producción, almacenamiento y uso del hidrógeno (QU-001).

Infraestructura

El ININ cuenta con equipos para la síntesis, caracterización de propiedades físicas y evaluación de propiedades catalíticas que se listan a continuación:

Síntesis

- Dos fuentes de radiofrecuencia de 13.56 MHz, una con potencia de hasta 1200 W y otra con potencia hasta 600 W, ambas con redes de acoplamiento automáticas, sistemas de vacío con base en bombas mecánicas y turbomoleculares, espectrómetros de masa para medición de presiones parciales hasta de 200 unidades de masa atómica, monocromadores/espectrógrafos, uno con una cámara de detección intensificada y el otro con detectores del tipo fotomultiplicadores.
- Sistema de depósito de películas delgadas por ablación láser, con dos láseres de Nd:YAG de 850 mJ, con emisión en la línea fundamental y los dos primeros armónicos.
- Sistema de depósito de películas delgadas por pulverización catódica.
- Sistemas de depósito híbridos de ablación láser con evaporación térmica y pulverización catódica.
- Sistema de preparación de nanomateriales por ablación láser en medio líquido.
- Cajas de guantes para la obtención de nanocatalizadores en medio orgánico
- Equipo de microondas.
- Molinos de aleado mecánico.

Caracterización de propiedades físicas y químicas

- Sistema de caracterización de catalizadores BELCAT-B equipado con espectrómetro de masas BELMass y CATCryo.
- Equipo multitareas RIG-100.
- Cromatógrafos de gases.
- Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier en su modalidad de reflectancia difusa (DRIFT) y cámara catalítica.
- Equipos de microscopía electrónica para la caracterización de los materiales catalíticos.
- Potenciostato/galvanostato Princeton Applied Research, programador universal EG&G Park provisto de un programa para análisis electroquímicos: Echem.
- Bipotenciostato AFCBP1 acoplado a un rotor con velocidad modulada AFMSRCE ambos de Pine Instruments Co.



FIGURA 3. Equipos de caracterización de nanocatalizadores para la obtención de hidrógeno.

- Baño de agua con control de temperatura.
- Equipos para determinar área superficial por método BET; analizadores de poros, Bel Sorp max Bel Japan Inc.
- Equipo de infrarrojo,
- Analizadores termogravimétricos y calorímetros diferenciales de barrido
- Espectrómetro microRaman, LabRam 800 de Horiba con láser de Nd:YAG con emisión en 532 nm.
- Espectrofluorómetro, Fluoromax de Horiba.

Adicionalmente, existen en el ININ laboratorios con equipos especializados destinados a la caracterización de nanomateriales: dos microscopios electrónicos de barrido (SEM), un microscopio electrónico de transmisión (TEM); cada uno tiene acoplado un espectrómetro de dispersión de energía de rayos-X para análisis químico elemental (EDS). También se cuenta con un sistema para análisis elemental por microfluorescencia de rayos-X (μ -EDXRF) y un sistema de retrodispersión de difracción de electrones (EBSD). Se tiene una cámara digital sCMOS para la adquisición de imágenes con resolución atómica, patrones de difracción de área selecta (SAED) y nanodifracción (NBD) en TEM. Un microscopio de sonda de barrido con capacidad para hacer microscopía de fuerza atómica y de tunelamiento. Se cuenta con un difractor de rayos-X para polvos con óptica de Bragg-Brentano y un difractor de rayos-X de óptica múltiple, que permite realizar distintas técnicas

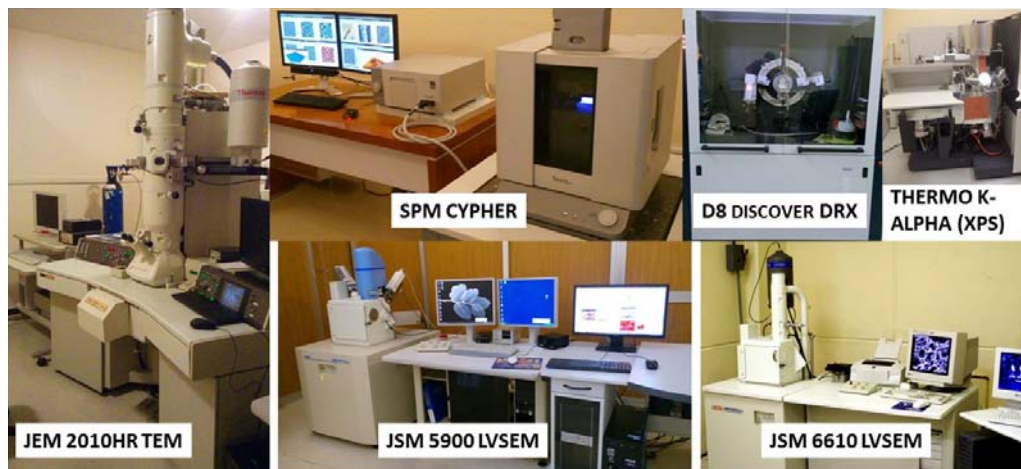


FIGURA 4. Equipos disponibles para la caracterización de los materiales catalíticos.

de análisis cristalográfico como difracción de amplio rango, microdifracción (μ -XRD), dispersión de rayos-X a bajo ángulo (SAXS), cuenta además con una platina de calentamiento. Se tienen equipos de preparación de muestras para microscopía electrónica: ultramicrotomo, electropulidor Twin-Jet, equipos para recubrir la superficie con carbono y oro de muestras no conductoras (*Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, vol. 9, núm.17, 2016: 159-174). Se cuenta también con un equipo para espectroscopía fotoelectrónica de rayos-X (XPS).

Evaluación de propiedades catalíticas

- Reactores de cuarzo de lecho fijo en flujo dinámico.
- Reactores de fotocatalisis.
- Celdas de combustible tipo PEM.
- Celdas de combustible alcalinas.
- Celdas de carbonatos fundidos.

Docencia y formación de recursos humanos

El ININ no otorga grados académicos y no cuenta con programas de posgrado, no obstante, como estrategia para formar recursos humanos, la principal colaboración con instituciones externas ha sido a través de la codirección de tesis con académicos adscritos a programas académicos en química, ambiental y ciencia de materiales con formación en temas de catálisis de las instituciones siguientes:

- Universidad Nacional Autónoma de México.
- Universidad Autónoma del Estado de México.
- Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Universidad Autónoma Metropolitana (campus Lerma e Iztapalapa).
- Universidad Autónoma de Querétaro.
- Universidad Tecnológica del Valle de Toluca.
- Instituto Tecnológico de Toluca.
- Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso.
- Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán.
- Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez Chiapas.
- Centro de Investigación y Estudios Avanzados.
- Instituto Politécnico Nacional.
- Escuela Nacional Superior de Química de París (École Nationale Supérieure de Chimie de Paris ENSCP-Paris-Tech).
- Universidad de Columbia Británica, Vancouver, Canadá.

La contribución del ININ en la formación de recursos humanos en temas relacionados con la catálisis ha dado como resultado la formación de un buen número de estudiantes de licenciatura, maestría, doctorado y posdoctorado.

Principales logros del ININ en catálisis

El trabajo de investigación en catálisis realizado en el ININ se puede resumir en los siguientes logros:

- Desarrollo de catalizadores unidimensionales 1D (*rods*) con morfologías y planos cristalográficos preferenciales para la generación de hidrógeno a partir del reformado de alcoholes y metano.
- Se ha logrado obtener de forma sistemática películas de N-TiO₂ tanto en la fase de anatasa como combinadas de anatasa/rutilo, las cuales fueron dopadas con nitrógeno y en pruebas preliminares, una aplicación de las mismas ha sido en la degradación del azul de metileno en concentraciones de 5 ppm del 15% solo con TiO₂ y se incrementó al 35% con N-TiO₂.
- El uso de radiocatálisis ha demostrado ser efectivo en la degradación de colorantes (rojo Congo y azul de metileno), organoclorados (4-clo-rofenol) y contaminantes emergentes (diclofenaco), que depende de las condiciones de reacción. Se trataron con éxito muestras industriales de líquidos penetrantes y aguas residuales de una planta de tratamiento con alto contenido de demanda química de oxígeno (DQO). Obtención de nanomateriales capaces de absorber luz visible para activarse como fotocatalizadores y emplearse en la degradación de compuestos orgánicos en solución, como fármacos o colorantes presentes en aguas residuales, utilizando luz solar.

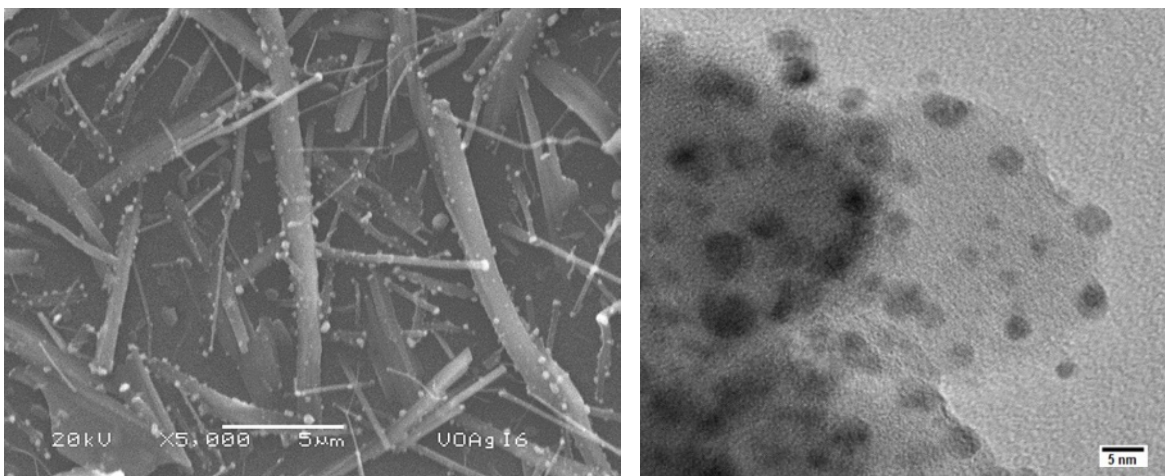


FIGURA 5. (Izq.) Nanobarras de vanadato de plata (AgVO_3) decoradas con nanopartículas de plata para aplicaciones en fotocatalisis. (Dcha.) Imagen de microscopía de trasmisión (TEM) de nanopartículas de plata sintetizadas por sol-gel para las reacciones de reducción y desprendimiento de oxígeno.

- Preparación y caracterización de nanopartículas de Au, Ag y Bi por ablación láser en vacío y en medio líquido, logrando obtener nanopartículas y nanoestructuras novedosas con un buen control en el tamaño y forma y por lo tanto en sus propiedades físicas.
- Preparación de nanoestructuras bidimensionales por ablación en medio líquido mediante un sistema asistido por ultrasonido. Algunas de estas nanoestructuras se han soportado sobre películas delgadas de TiO_2 con el propósito de mejorar su desempeño fotocatalítico en la degradación de moléculas orgánicas.
- Preparación de películas delgadas bifuncionales para uso en celdas de combustible regenerativas y que pueden comportarse como celda de combustible al cambiar su polaridad, llevando a cabo la reacción de reducción de oxígeno de manera directa sin la presencia de intermediarios de reacción.
- Preparación de bicapas TiO_2/ITO /vidrio por ablación láser sobre fibras ópticas de 500 μm de diámetro para sistemas electrocatalíticos.
- Preparación de nanomateriales híbridos formados por nanopartículas de Au, Ag, Bi, Zn, soportadas o embebidas en películas delgadas de TiO_2 y V_2O_5 , o incluso en otros materiales
- Obtención de aleaciones o de metales nanoparticulados por aleado mecánico, por sol-gel o por la técnica de microondas para ser utilizadas en celdas de combustible.
- Modificar la superficie del níquel con óxidos de metales de transición y/o lantánidos para incrementar el tiempo de vida del cátodo en las celdas de carbonatos fundidos.

Perspectivas sobre el estudio en catálisis

Los grupos de investigación en catálisis del ININ consideran que la investigación que realizan es promisoría y tiene aplicaciones potenciales a nivel industrial, ya que pueden contribuir al desarrollo tecnológico que México requiere. En este sentido, se plantean algunas de estas perspectivas:

- Reducción de la contaminación ambiental mediante el desarrollo de nuevas fuentes integrales de energía limpia (hidrógeno) utilizando catalizadores “a la medida”, esto es, nanomateriales con propiedades específicas para la aplicación particular. Lo anterior, con el propósito de promover la cultura de desarrollo sustentable en materia de energía y ambiente.
- Las reacciones inducidas sobre superficies sólidas por fotones y por radiación de alta energía son de particular interés para la catálisis y la ciencia de materiales. Sin embargo, en contraste con la gran cantidad de investigaciones sobre catálisis en fase gas-sólido y líquido-sólido utilizando fotones (fotocatálisis), la química de radiaciones ionizantes en sistemas heterogéneos (radiocatálisis) está lejos de ser comprendida. Se plantea contribuir en el estudio de radiaciones ionizantes y catalizadores para modificar las reacciones de degradación de compuestos orgánicos y poder entender mejor los procesos por su mecanismo y cinética.
- Las películas formadas sobre los sustratos de vidrio y silicio se espera aplicarlas, entre otros, en un futuro cercano, en la remoción de contaminantes tóxicos en aire y agua, en hospitales y la industria de los alimentos debido a sus propiedades bactericidas, degradación del azul de metileno empleado en la industria textil, generación de hidrógeno por separación de agua. En un futuro cercano las películas de N-TiO₂ serán co-dopadas con metales, esto con el objetivo de reducir la energía del ancho de banda prohibida y lograr una mayor eficiencia en la catálisis.
- Modificar el TiO₂ y V₂O₅ con dos o más metales con el propósito de mejorar su desempeño fotocatalítico en la degradación de fármacos.
- Explorar otras aplicaciones potenciales de los materiales que ya se preparan, en particular, en el área de fotocatalisis para la obtención de hidrógeno o para el tratamiento de aguas residuales, trabajando con sistemas más cercanos a los reales.
- Obtención de películas por la técnica de depósito atómico (*atomic layer deposition*) para entender y prevenir la degradación del cátodo de níquel en celdas de carbonatos fundidos.
- Iniciar el trabajo de desarrollo de patentes en los casos susceptibles de poder lograrse.

A manera de conclusión, queremos señalar que la catálisis en México se realiza de forma aislada por diferentes grupos en universidades e institutos de investigación, sin embargo, es necesario impulsar mecanismos de interacción entre los diferentes grupos y de esta forma avanzar como un frente común que permita resolver problemas ambientales y energéticos en nuestro país, para desarrollar tecnologías nacionales que redunden en beneficios sociales y que permitan un mejor progreso de la nación. En particular, en el ININ, se ha conformado un grupo de trabajo interinstitucional que realiza investigación científica de alta calidad en la síntesis y caracterización de nanomateriales con aplicaciones potenciales en diversas áreas de la catálisis, propiciando el intercambio de experiencias entre los diferentes investigadores que participan en diferentes campos de investigación en catálisis. Los resultados del trabajo de investigación realizado en el ININ se reflejan en la generación de nuevos conocimientos en las áreas de catalizadores y electrocatalizadores para emplearlos en la generación de combustibles alternos al petróleo, así como en la síntesis de nuevos materiales fotocatalíticos para tratamiento de agua; los cuales son presentados en foros científicos llevados a cabo por diferentes organizaciones científicas nacionales, entre ellas, la Academia de Catálisis A.C. (ACAT) y la Sociedad Mexicana del Hidrógeno (SMH). Adicionalmente, redundan en la formación de recursos humanos altamente calificados en temas relacionados con la catálisis.

Referencias recientes (o más relevantes) del ININ en investigación en catálisis

- R. Pérez-Hernández, A. Gutiérrez-Martínez, M. E. Espinosa-Pesqueira, Ma. L. Estanislao, J. Palacios. Effect of the bimetallic Ni/Cu loading on the ZrO₂ support for H₂ production in the autothermal steam reforming of methanol. *Catalysis Today*, 250, (2015), 166–172.
- R. Pérez-Hernández, G. Mondragón-Galicia, A. Allende Maravilla y J. Palacios. Nano-dimensional CeO₂ nanorods for high Ni loading catalysts: H₂ production by autothermal steam reforming of methanol reaction. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15 (30) (2013), 12702-12708.
- E. Casillas, F. Tzompantzi, S. G. Castellanos, G. Mendoza-Damián, R. Pérez-Hernández, A. López-Gaona, A. Barrera. Promotion effect of ZnO on the photocatalytic activity of coupled Al₂O₃-Nd₂O₃-ZnO composites prepared by the sol – gel method in the degradation of phenol, *Journal Applied Catalysis B: Environmental*, 208, (2017), 161–170.
- Gilberto Mondragón-Galicia, Claudia Gutiérrez-Wing, María Eufemia Fernández García, Demetrio Mendoza-Anaya y Raúl Pérez-Hernández. Ag nanowires as precursors to synthesize Ag-ZnO nanostructured brushes, *RSC Advances*, 5, (2015), 42568-12571.
- Raúl Pérez-Hernández, Demetrio Mendoza-Anaya, Albina Gutiérrez Martínez y Antonio Gómez-Cortés. Capítulo 6: Catalytic steam reforming of methanol

- to produce hydrogen on supported metal catalysts. pp. 149-256. <http://dx.doi.org/10.5772/49965>. En *Hydrogen Energy—Challenges and Perspectives*. <http://dx.doi.org/10.5772/2824>. Edited by Dragica Minić. Published by In-Tech-2012.
- A. Rodríguez-Méndez, I. Viveros-Palma, C. Guzmán, Eduardo A. Elizalde-Peña, L. Escobar-Alarcón, Marina Vega, Josefina Alvarado Rivera, K. Esquivel. Effluent disinfection of real wastewater by Ag-TiO₂ nanoparticles photocatalysis, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 17 (1), 711-719, (2017).
- Emmanuel Velarde Granados, Luis Escobar Alarcón, Dora Alicia Solís Casados, Cecilia Encarnación Gómez, Oscar Fernando Olea Mejía, Manuel Espinosa Pesqueira, Emmanuel Haro Poniatowski. Nanoestructuras basadas en Bi soportadas en películas delgadas de TiO₂ y su desempeño fotocatalítico, *Superficies y Vacío*, 28 (2) 54-60, (2015).
- Jonatán Pérez-Alvarez, Dora A. Solís-Casados, Saúl Romero, Luis Escobar-Alarcón. Photocatalytic degradation of malachite green dye and pharmaceuticals using Co:TiO₂ thin films, *Advanced Materials Research*, 976, 212-216, (2014).
- F. Gonzalez-Zavala, L. Escobar-Alarcón, D. A. Solís-Casados, C. Rivera-Rodríguez, R. Basurto, E. Haro-Poniatowski. Preparation of vanadium oxide thin films modified with Ag using a hybrid deposition configuration, *Applied Physics A*, 122: 461, (2016).
- Escobar-Alarcón L., Morales-Ramírez C., Klimova T., Escobar-Aguilar J., Romero S., Solís-Casados D. Preparation and characterization of Al₂O₃-MgO catalytic supports modified with lithium, *Fuel*, 110, 278-285, (2013).
- J. Jiménez-Becerril, A. Martínez-Hernández, F. Granados-Correa, R. E. Zavala-Arce. Methylene blue and 4-chlorophenol photodegradation using gamma-irradiated titanium oxide, *J. Chem. Soc. Pak.*, 2013, 35 (1), 23-26
- J. C. González-Juárez, J. Jiménez-Becerril, J. Cejudo-Álvarez. Degradation of 4-chlorophenol by gamma radiation of 137Cs and X-rays, *J. Mex. Chem. Soc.*, (2010), 54 (1), 2-6.
- J. C. González-Juárez, J. Jiménez-Becerril. Gamma radiation-induced catalytic degradation of 4-chlorophenol using SiO₂, TiO₂, and Al₂O₃. *Rad. Phys. Chem.*, (2006), 75, 768-772.
- J. Jiménez-Becerril, A. Moreno-López, M. Jiménez-Reyes. Radiocatalytic degradation of dissolved organic compounds in wastewater. *NUKLEONIKA*, (2016), 61 (4), 473-476.
- J. Jiménez-Becerril, J. C. González-Juárez, R. Contreras-Bustos. Penetrant liquid waste degradation by radiocatalysis, *J. Residuals Sci. Tech.*, (2013), 10 (4), 171-177.
- R. Valencia-Alvarado, A. de la Piedad-Beneitez, R. López-Callejas, A. Mercado-Cabrera, R. Peña-Eguiluz, A. E. Muñoz-Castro, B. G. Rodríguez-Méndez, y J. M. de la Rosa-Vázquez. TiO₂ thin and thick films grown on Si/glass by sputtering of Titanium targets in an RF inductively coupled plasma, *Journal of Physics: Conference Series*, 591, (2015), 012042.
- R. Valencia-Alvarado, A. de la Piedad-Beneitez, R. López-Callejas, B. G., Rodríguez-Méndez, A. Mercado-Cabrera, R. Peña-Eguiluz, A. E. Muñoz-Castro y J. M. de

- la Rosa-Vázquez. Sequential processes to produce N-TiO₂ films through Rf plasmas, *MATEC Web of Conferences*, 67, (2016), 06075.
- R. Valencia-Alvarado, A. de la Piedad-Beneitez, R. López-Callejas, B. G., Rodríguez-Méndez, A. Mercado-Cabrera, R. Peña-Eguiluz, A. E. Muñoz-Castro, y J. M. de la Rosa-Vázquez. Titanium dioxide films grown on glass and silicon by sputtering, *Kasmera Journal*, 44-1, (2016), 423-441.

Sitios de interés relacionados de ININ

- Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares | Gobierno | gob.mx, Website title: Gob.mx, URL: <<https://www.gob.mx/inin/>>
- Facebook: <<https://www.facebook.com/ININmx-457060114342632/>>
- Twitter: <https://twitter.com/inin_mx>
- Instagram: <<https://www.instagram.com/ininmx/>>
- YouTube: <<https://www.youtube.com/channel/UCd305j-hk0Pnb2QK0Od9ryQ>>

INSTRUCTIVO PARA AUTORES

Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología invita a enviar colaboraciones para su siguiente número. Éstas deben tener el objetivo de diseminar los avances y resultados del quehacer científico y humanístico en las áreas de la nanociencia y la nanotecnología por medio de artículos de divulgación escritos en español. Esta publicación está dirigida tanto a profesionistas como a estudiantes interesados en aumentar sus conocimientos sobre la nanociencia y la nanotecnología.

Aplicación de criterios éticos

Esta publicación se adhiere a la declaración y normas del Committee on Publication Ethics (COPE).

Revisión de pares

Los artículos son sometidos a revisión por especialistas en el tema, en la modalidad de doble ciego.

La revista está organizada en las siguientes secciones:

Cartas de los lectores

Cartas con sugerencias, comentarios o críticas sobre artículos aparecidos en números anteriores de la revista.

Noticias

Notas breves que expliquen descubrimientos científicos, actos académicos, reconocimientos importantes otorgados.

Artículos

Artículos de divulgación sobre aspectos científicos y tecnológicos, políticoeconómicos, éticos, sociales y ambientales de la nanociencia y la nanotecnología. Deben plantear aspectos actuales y brindar la información necesaria para que un lector no especializado en el tema lo pueda entender. Se deberá hacer hincapié en las contribuciones de los autores y mantener una alta calidad de contenido y análisis. (Deberán iniciar con el resumen y palabras clave en español seguidos del respectivo *abstract* y *keywords* en inglés).

Reseñas de libros

Reseñas sobre libros publicados recientemente en el área de nanociencia y nanotecnología.

Imágenes

Se publicarán las mejores fotos o ilustraciones en nanociencia y nanotecnología, las cuales serán escogidas por el comité editorial.

MECANISMO EDITORIAL

- I. Toda contribución deberá ser original (no haber sido remitida para su publicación en otra revista) y será sometida a arbitraje por expertos en la materia externos a las entidades editoras. Los criterios que se aplicarán para decidir sobre la publicación del manuscrito serán la calidad científica del trabajo, la precisión de la información, el interés general del tema y el lenguaje claro y comprensible utilizado en la redacción. Los trabajos aceptados serán revisados por un editor de estilo. La versión final del artículo deberá ser aprobada por el autor, sólo en caso de haber cambios sustanciales.

Para enviar sus artículos, los autores deberán darse de alta en el sistema en línea (Open Journal Systems, OJS) de la revista: <<http://www.revistas.unam.mx/index.php/nano/login>>, y en esta plataforma subir el texto, resumen, palabras clave y figuras. Para contactar a los editores en relación con otras cuestiones, escriba a: (mundonanonam@gmail.com).

- II. Los manuscritos cumplirán con los siguientes lineamientos:
 - a) Estar escritos en Microsoft Word, en página tamaño carta, y tipografía Times New Roman en 12 puntos, a espacio y medio. Tamaño máximo de las contribuciones: noticias, una página; cartas de los lectores, dos páginas; reseñas de libros, tres páginas; artículos completos, quince páginas.
 - b) En la primera página deberá aparecer el título del artículo; el nombre del autor o autores; el de sus instituciones de adscripción con las direcciones postales y electrónicas de cada uno de ellos, así como los números telefónicos.
 - c) Enviar un breve anexo que contenga: resumen del artículo y palabras clave (con las correspondientes traducciones al inglés tanto del resumen como de las palabras clave), importancia de su divulgación y un resumen curricular de cada autor que incluya: nombre, grado académico o experiencia profesional, número de publicaciones, distinciones y proyectos más relevantes.
 - d) Las referencias, destinadas a ampliar la información que se proporciona al lector deberán ser citadas en el texto. Las fichas bibliográficas correspondientes serán agrupadas al final del artículo, en orden alfabético. Ejemplos:
 1. Artículos en revistas (no se abrevien los títulos ni de los artículos ni de las revistas):
N. Takeuchi, N. (1998). Cálculos de primeros principios: un método alternativo para el estudio de materiales. *Ciencia y Desarrollo*, vol. 26, núm. 142, 18.
 2. Libros:
Delgado, G. C. (2008). *Guerra por lo invisible: negocio, implicaciones y riesgos de la nanotecnología*. CEIICH-UNAM. México.
 3. Internet:
NobelPrice.org. (2007). The Nobel Prize in Physics 1986. En: <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/press.html>.
 4. En el cuerpo del texto, las referencias deberán ir como en el siguiente ejemplo:
“...y a los lenguajes comunes propuestos (Amozurrutia, 2008a) como la epistemología...”
Si son varios autores, la referencia en el cuerpo del texto irá:
(García-Sánchez *et al.*, 2005; Smith, 2000).

PRIMERO EN LÍNEA

Los artículos que no puedan ser incluidos en el número inmediato a la fecha de aceptación serán publicados en la sección “Primero en línea” e integrados posteriormente a un volumen y número específicos de la revista.

