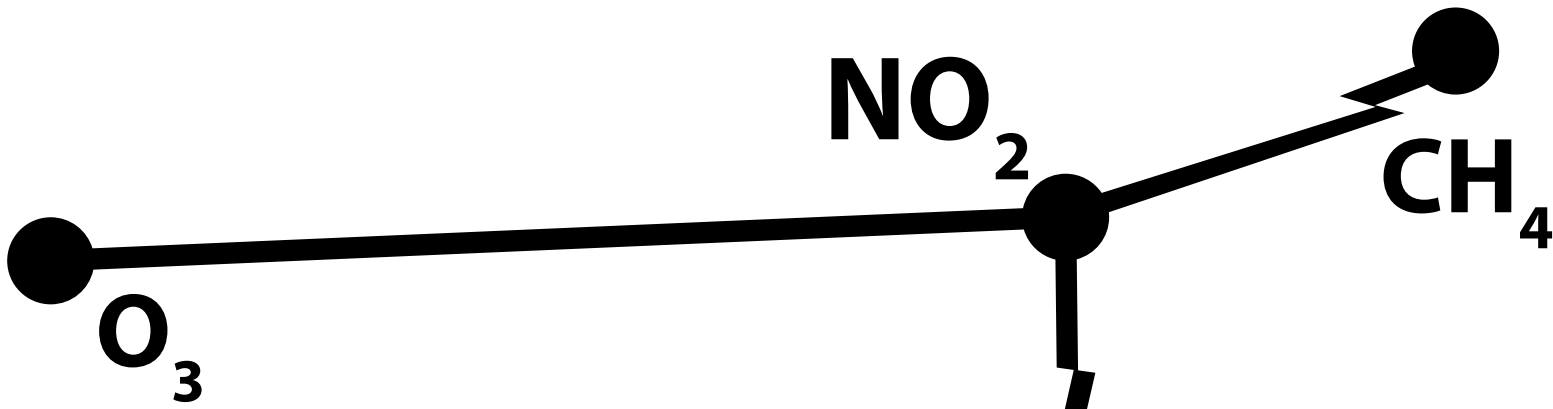




Nanotecnologías

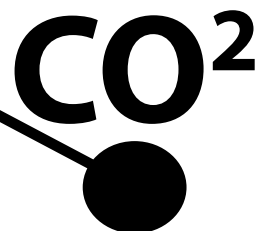
que contribuyen en la mitigación
de la contaminación atmosférica

Miriam Sarai Cruz Leal



Nanotecnologías

que contribuyen en la mitigación
de la contaminación atmosférica



Miriam Sarai Cruz Leal

Sergio Salomón Céspedes Peregrina
Gobernador Constitucional del Estado de Puebla

Javier Aquino Limón
Secretario de Gobernación del Estado de Puebla

Gabriela Bonilla Parada
Presidenta del Sistema Estatal para el
Desarrollo Integral de la Familia

María Isabel Merlo Talavera
Secretaría de Educación del Estado de Puebla

Eduardo Castillo López
Presidente de la Junta de Gobierno y Coordinación Política del
H. Congreso del Estado Libre y Soberano de Puebla

María Belinda Aguilar Díaz
Presidenta del Tribunal Superior de Justicia del Estado de Puebla

Victoriano Gabriel Covarrubias Salvatori
Director General del Consejo de Ciencia y Tecnología
del Estado de Puebla

Luis Gerardo Aguirre Rodríguez
Responsable del Área de Publicaciones

Eduardo Jáuregui Sainz de Rozas
Jesús Iglesias Castelán
María Ixel Hernández Hernández
Corección de estilo

Luis Gerardo Aguirre Rodríguez
Diseño editorial y de portada

Primera edición, México, 2023

Publicado por el Consejo de Ciencia y Tecnología de Puebla
(CONCYTEP) B Poniente de La 16 de Sept. 4511,
Col. Huexotitla, 72534. Puebla, Pue.

ISBN: 978-607-8963-03-4

CÓDIGO IDENTIFICADOR CONCYTEP: C-L-2024-01-24

La información contenida en este documento puede ser reproducida total o
parcialmente por cualquier medio, indicando los créditos
y las fuentes de origen respectivas.

Miriam Sarai Cruz Leal
***miriamsarai.cruzleal@viep.com.mx**
Autora

Agradecimientos

Al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla (CONCYTEP) por el apoyo
brindado para la publicación de este libro.

A Nicolás Morales López por el apoyo en diseño de gráficos y figuras.

Las opiniones vertidas en el presente documento son responsabilidad única de las y los autores,
y no representa la postura de la institución que edita.

Í n d i c e

PRÓLOGO.....	1
RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3

CAPÍTULO 1

LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN EL ESTADO DE PUEBLA

Miriam Sarai Cruz-Leal, Gabriela Vidal García

1. Introducción.	5
2. Atmósfera	5
3. El efecto invernadero y el calentamiento global.	7
4. Contaminación atmosférica.	8
5. Situación actual de la contaminación atmosférica en el estado de Puebla	9
6. Estrategias para mejorar la calidad del aire	14
7. Conclusiones	17
8. Referencias	18

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES SOBRE NANOTECNOLOGÍA Y NANOMATERIALES

Itzel Pamela Torres Ávila

1. Introducción.	19
2. Presencia de la nanotecnología.	20
3. Clasificación de los nanomateriales	21
4. Propiedades de los nanomateriales	23
5. ¿Cómo se fabrican los nanomateriales?	25
6. Caracterización de nanomateriales.	27
7. Aplicaciones de los nanomateriales	29
8. Conclusiones.	33
9. Referencias	35

CAPÍTULO 3

SENSORES DE GAS PARA LA DETECCIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

O. Goiz, G. F. Pérez-Sánchez

1. Introducción.	37
2. Importancia de la detección de contaminantes atmosféricos	38
3. Estaciones de monitoreo atmosférico	40
4. Tipos de sensores de gas	43
5. Desafíos y avances en la tecnología de los sensores de gas.	45
6. Conclusiones.	49
7. Referencias	49

CAPÍTULO 4

NANOMATERIALES PARA LA CAPTURA DE GASES CONTAMINANTES

K. Quiroz-Estrada, Diana Guerrero-Araque, M.E. Velásquez-Torres

1. Introducción.	51
2. Adsorción y porosidad	53
3. Nanomateriales y materiales nanoporosos adsorbentes de GEI	57
4. Nanomateriales para la captura de CO ₂	59
5. Conclusiones.	63
6. Referencias	63

CAPÍTULO 5

NANOMATERIALES PARA EL APROVECHAMIENTO DE GASES CONTAMINANTES

Eric Aguilar García, Hernani Yee-Madeira

1. Introducción.	69
2. Nanomateriales para el aprovechamiento de CO ₂	70
3. Nanomateriales para el aprovechamiento de NO _x	75
4. Nanomateriales para el aprovechamiento de H ₂ S	78
5. Conclusiones.	81
6. Referencias	82
Semblanzas	86

P R Ó L O G O

Sin duda alguna, la ciencia siempre debe estar al servicio de la sociedad para solucionar las diferentes problemáticas que la aquejan. Por años, diferentes grupos de investigación han puesto todos sus esfuerzos en atender los problemas que mayormente afectan al desarrollo de la vida en el planeta, como la contaminación ambiental. Como es sabido, la contaminación del suelo, agua y aire ocasionan afectaciones graves e irreversibles a los diferentes ecosistemas del planeta, provocando que estos cambien o desaparezcan, y con ello muchas especies se extinguen anualmente. Además, la contaminación afecta a la salud de toda la población y cada año millones de pesos son destinados para atender enfermedades causadas por esta.

La contaminación del aire causa graves problemas a la salud, principalmente a las vías respiratorias, y es causada por la emisión de gases contaminantes generados en su mayoría por actividades antropogénicas: generación de energía, movilidad y transporte, entre otras, aunque también existen las fuentes naturales, como en el caso particular de la ciudad de Puebla, donde la principal fuente natural de contaminación del aire es el volcán Popocatepetl, que afecta no solo a la capital del estado, sino también a ciudades y poblaciones vecinas.

En este sentido, es de gran importancia implementar tecnologías que ayuden a la mitigación de la contaminación, como es el desarrollo de nanomateriales. En años recientes estos han tomado gran relevancia debido a las propiedades y características que pueden presentar y desarrollar, lo que los convierte en sistemas con múltiples aplicaciones. Aunque se requieren metodologías específicas para obtener materiales a escala nanométrica, son viables, lo que ha permitido que se explore la nanotecnología más a fondo y con nuevas aplicaciones.

En esta obra, las y los autores recopilaron información de diversos medios: informes de instancias gubernamentales, tesis, libros y artículos científicos, sumando sus experiencias a lo largo de su desarrollo profesional y académico, y lograron realizar un estudio amplio sobre el uso de nanomateriales y sus aplicaciones para la remediación del aire. Por otro lado, aunque han trabajado por años con la síntesis, funcionalización, caracterización y aplicación de diferentes tipos de nanomateriales, cada uno ha desarrollado sus trabajos de investigación encaminados hacia diferentes enfoques. Sin embargo, todos llegan al mismo punto: aprovechar las propiedades de los nanomateriales para mitigar la contaminación, ya sea como identificadores de gases contaminantes o removiéndolos y aprovechándolos como materias primas, no solo del aire, sino también del suelo y agua; esto ha enriquecido enormemente el trabajo presentado a continuación.

Sin más preámbulo, se espera que este libro sirva a quienes lo lean y les brinde información valiosa sobre la contaminación ambiental, realidades de la nanotecnología y un panorama amplio de las aplicaciones ambientales, específicamente del aire.

R E S U M E N

Este libro da una visión general de la contaminación del aire, en particular en el estado de Puebla, y las principales causas y consecuencias que se generan. Así mismo, da un panorama del origen, desarrollo, síntesis, características y propiedades de los nanomateriales. Estos al lograrse funcionalizar pueden adquirir múltiples aplicaciones, por ejemplo, como sensores, cuya importancia radica en la posibilidad de detectar gases contaminantes y tóxicos para población con alta sensibilidad y selectividad, lo que podría evitar sobreexposición a estos. Por otro lado, otra aplicación de importancia es la captura de gases contaminantes como CO₂, NO_x, y SO_x por el proceso de adsorción, donde estos gases se mantienen retenidos en las desarrolladas superficies de los nanomateriales, lo que permitiría la remediación del aire. Además, mediante este proceso se podrían regenerar, con lo cual se usarían varias veces. Igualmente, con los nanomateriales se pueden transformar los gases contaminantes en compuestos utilizados para obtener nuevos productos, es decir, además de eliminar gases problemáticos para el ambiente y la salud humana, son aprovechados para obtener nuevos productos con alto valor agregado. A pesar de que cada día se hacen investigaciones para atender el problema de la contaminación, en las que se aplica el desarrollo de la ciencia y tecnología, como la aplicación de nanomateriales funcionalizados, aún queda mucho trabajo por hacer.

A B S T R A C T

This book provides an overview of air pollution, particularly in the state of Puebla, and the leading causes and consequences that are generated by it. It also gives an overview of the origin, development, synthesis, characteristics, and properties of nanomaterials. When nanomaterials are functionalized, they can acquire multiple applications, such as sensors, whose importance lies in the fact that it is possible to detect polluting and toxic gases for the population with high sensitivity and selectivity, avoiding overexposure to these gases. On the other hand, another important application is the capture of polluting gases such as CO₂, NO_x, and SO_x by the adsorption process, where these gases are retained in the developed surfaces of the nanomaterials, allowing air remediation. In addition, through this process, nanomaterials could be regenerated, with which they can be used several times. Nanomaterials can also be used to transform polluting gases into compounds used to obtain new products. That is, in addition to eliminating gases that are problematic for the environment and human health, nanomaterials can be used to obtain new products with high added value. Although research is being done daily to deal to the pollution problem, where the development of science and technology is applied, such as functionalized nanomaterials, there is still much to be done.

CAPÍTULO 1

LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN EL ESTADO DE PUEBLA

Miriam Sarai Cruz-Leal ¹, Gabriela Vidal García ²

1. Centro de Investigación en Fisicoquímica de Materiales, ICUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Eco Campus Valsequillo VAL-3, San Pedro Zacachimalpa, Pue., C.P. 72960, México

2. Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad Universitaria, Puebla, Pue., C.P. 72570, México

1. Introducción

La contaminación atmosférica ocurre cuando la presencia de gases, vapores o partículas alteran la calidad del aire, lo que provoca afectaciones en la salud humana y en los ecosistemas. Dichos contaminantes pueden provenir de fuentes naturales o antropogénicas.

En este capítulo, se abordan conceptos generales sobre la atmósfera, su composición, su papel en la preservación de la vida en la tierra, la situación de la calidad del aire en el estado de Puebla y los principales contaminantes. En la parte final, se presentan algunas estrategias para mejorar el aire que se respira.

2. Atmósfera

La atmósfera terrestre está conformada por distintos gases, principalmente nitrógeno (78%) y oxígeno (21%); el porcentaje restante se conforma de dióxido de carbono, argón, ozono, helio, metano, entre otros. En la atmósfera también se pueden encontrar partículas sólidas y líquidas, como polvos y aerosoles (Manahan, 2001).

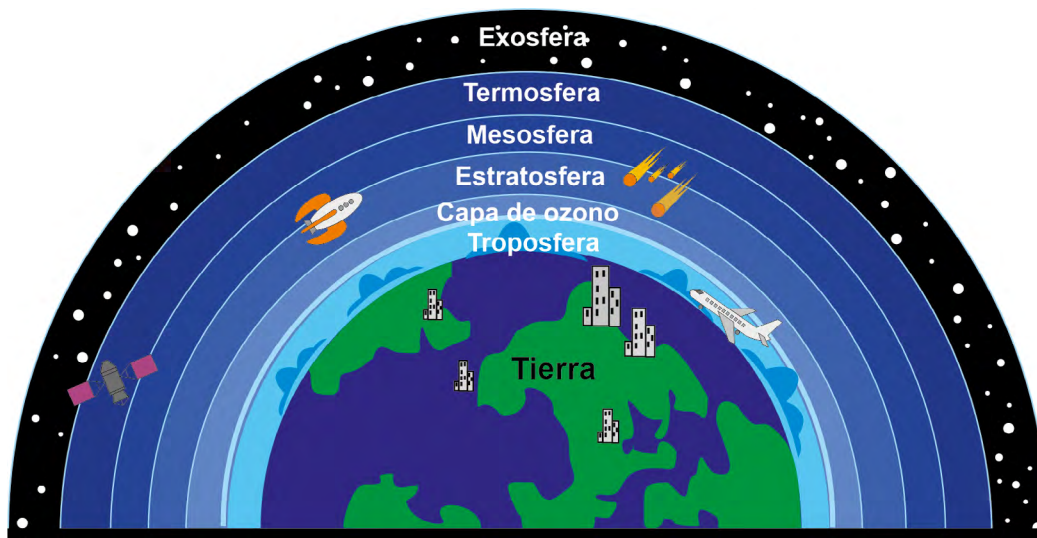
La atmósfera es muy importante para la conservación de la vida en el planeta, ya que crea las condiciones adecuadas de oxígeno que se requiere para vivir. También sirve

para controlar la temperatura, absorber y dispersar la radiación solar, además de ser vital durante el ciclo del agua. Se divide en diferentes capas y cada una tiene características muy particulares (Figura 1.1).

Las capas son (Manahan, 2001):

- **Troposfera:** Es la capa más baja de la atmósfera terrestre y está en contacto directo con los seres vivos. Su extensión abarca desde la superficie terrestre hasta los 15 km y en ella se encuentran las nubes; aquí ocurren los fenómenos meteorológicos, como las tormentas y lluvias. Es igual donde se concentran los principales contaminantes atmosféricos provenientes de la actividad industrial, el transporte, la quema de combustibles fósiles y las emisiones de procesos naturales (como las emisiones volcánicas).
- **Estratosfera:** Es la segunda capa de la atmósfera terrestre. Se extiende desde los 15 hasta los 50 km sobre la superficie de la tierra. En esta se absorbe la radiación ultravioleta (UV) que puede ser dañina y se encuentra la capa de ozono.
- **Mesosfera:** Es la tercera capa de la atmósfera terrestre. Su extensión abarca desde los 50 hasta los 85 km de altitud y la temperatura es cercana a los -90°C ; en esta capa los meteoros se desintegran debido a la fricción con el aire.
- **Termosfera:** Es la cuarta capa de la atmósfera terrestre. Inicia a los 85 km y se extiende hasta los 600 km de altitud. Aquí, la temperatura es mayor debido a la absorción de la radiación solar. Esta región permite la adecuada propagación de ondas de radio a larga distancia, siendo de gran utilidad para las telecomunicaciones.
- **Exosfera:** Es la capa externa de la atmósfera terrestre. Se considera que se extiende desde aproximadamente 600 km de altitud hasta el límite exterior de la atmósfera. Esta capa es importante en misiones espaciales; aquí se ubica la estación espacial internacional.

Figura 1.1. La atmósfera



Fuente: Elaboración propia

3. El efecto invernadero y el calentamiento global

El efecto invernadero es un fenómeno natural que ocurre en la atmósfera debido a los gases que se encuentran en ella. Se presenta cuando una parte de los rayos del sol inciden en el planeta y se reflejan hacia el espacio, mientras que otra parte de esa radiación se absorbe y calienta al planeta, favoreciendo las condiciones de vida.

Los gases que favorecen o afectan la temperatura en la tierra (gases de efecto invernadero) son CO_2 , CH_4 , NO_2 y vapor de agua (Environmental Protection Agency, 2023). Si la acumulación de estos gases es alterada, el resultado puede ser peligroso, ya que se ve modificada la temperatura y esto puede atentar contra los ecosistemas y el bienestar humano. Este proceso se denomina calentamiento global.

El calentamiento global afecta los procesos naturales de la Tierra, dando lugar a efectos como el aumento de la temperatura del planeta, produciendo olas de calor que afectan a la salud humana y la agricultura. Además, provoca el derretimiento de los glaciares, la pérdida de biodiversidad y eventos climáticos extremos, reflejados en inundaciones y/o sequías.

Desafortunadamente, diversas actividades humanas liberan grandes cantidades de gases de efecto invernadero, haciendo que la tierra sea más cálida. Dichas actividades son principalmente la quema de combustibles fósiles, la deforestación, la

agricultura intensiva, las actividades industriales y el gran número de vehículos motorizados. En la actualidad, las emisiones de gases de efecto invernadero no han disminuido, al contrario, incrementan año con año (The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

4. Contaminación atmosférica

Como se ha mencionado, la atmósfera es esencial para el desarrollo y conservación de la vida en la tierra. Algunas sustancias pueden alterar las condiciones de la calidad del aire, las cuales provienen de fuentes naturales (gases y partículas de emisiones volcánicas) o son producto de las actividades humanas (gases originados por quema de combustibles fósiles, emisiones industriales, etc.). Algunos de los contaminantes más comunes son:

- Dióxido de carbono (CO_2): Es un gas presente en la atmósfera de forma natural, sin embargo, también se produce por la quema de combustibles fósiles. Algunas empresas liberan CO_2 como subproducto de sus procesos, por ejemplo, la industria cementera, de vidrio y de acero. En sí mismo, el incremento de este compuesto en la atmósfera no tiene un efecto tóxico en la salud humana, sin embargo, favorece al cambio climático, provocando el aumento de la temperatura, lo que se aprecia en sequías, olas de calor y tormentas extremas, afectando directamente en cultivos, asentamientos humanos y en el bienestar de las personas.
- Monóxido de carbono (CO): Se produce por la combustión incompleta de combustibles fósiles. Este gas es conocido como el “asesino silencioso”, debido a su naturaleza inodora, incolora y no irritante. La inhalación puede causar daños a la salud humana, como dolores de cabeza, náuseas y muerte en caso de intoxicación severa. En la naturaleza, este gas puede producir efectos negativos en ecosistemas terrestres y acuáticos, afectando el crecimiento y desarrollo de organismos y plantas. El CO contribuye al calentamiento global y formación de smog.
- Óxidos de nitrógeno (NO_x): Los NO_x se componen de óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2). Son generados principalmente por vehículos con motores de combustión interna; otra fuente son las industrias, en especial las centrales eléctricas. La presencia de estos compuestos gaseosos provoca la formación de smog y lluvia ácida.
- Compuestos orgánicos volátiles (COV): Son un grupo de compuestos químicos que contienen carbono, tales como la acetona, benceno, tolueno y xileno. Algunas fuentes de emisión son los vehículos de motor, actividades industriales y productos como aerosoles, barnices, pinturas y disolventes químicos, ya que pueden emitir COV cuando se evaporan.

- Ozono troposférico: A diferencia del ozono estratosférico, que es importante para la protección de la tierra contra los rayos UV, el ozono troposférico es un contaminante formado por la reacción entre NO_x y COV, que puede provocar daños en la salud, especialmente problemas respiratorios en personas vulnerables (niñas, niños y personas adultas mayores).
- Material particulado (PM por sus siglas en inglés): Son partículas sólidas o líquidas suspendidas en el ambiente que son emitidas por fuentes naturales y actividades humanas. Dentro de las fuentes naturales están las partículas de polvo y suelo (producidas por erosión), las producidas por incendios forestales y la ceniza volcánica. Las fuentes antropogénicas derivan de actividades industriales, como la quema de residuos, emisiones vehiculares y construcción. Dependiendo su tamaño se clasifican en:
 - PM₁₀: Partículas con diámetros menor o igual a 10 µm (micrómetros). Debido a su tamaño son fáciles de inhalar y pueden ingresar a las vías respiratorias, provocando daño en los pulmones.
 - PM_{2.5}: Partículas con diámetros menores o igual a 2.5 µm. Al ser más pequeñas que las PM₁₀, el daño en vías respiratorias es mayor.
 - PM_i: Son partículas con tamaño menor o igual a 1 µm. Por su tamaño pueden penetrar en los pulmones y ser absorbidas en el torrente sanguíneo.
 - PM_{0.1}: Son conocidas como partículas ultrafinas, con tamaño igual o menor a 0.1 µm. Pueden permanecer suspendidas por periodos prolongados y viajar con las corrientes de aire.

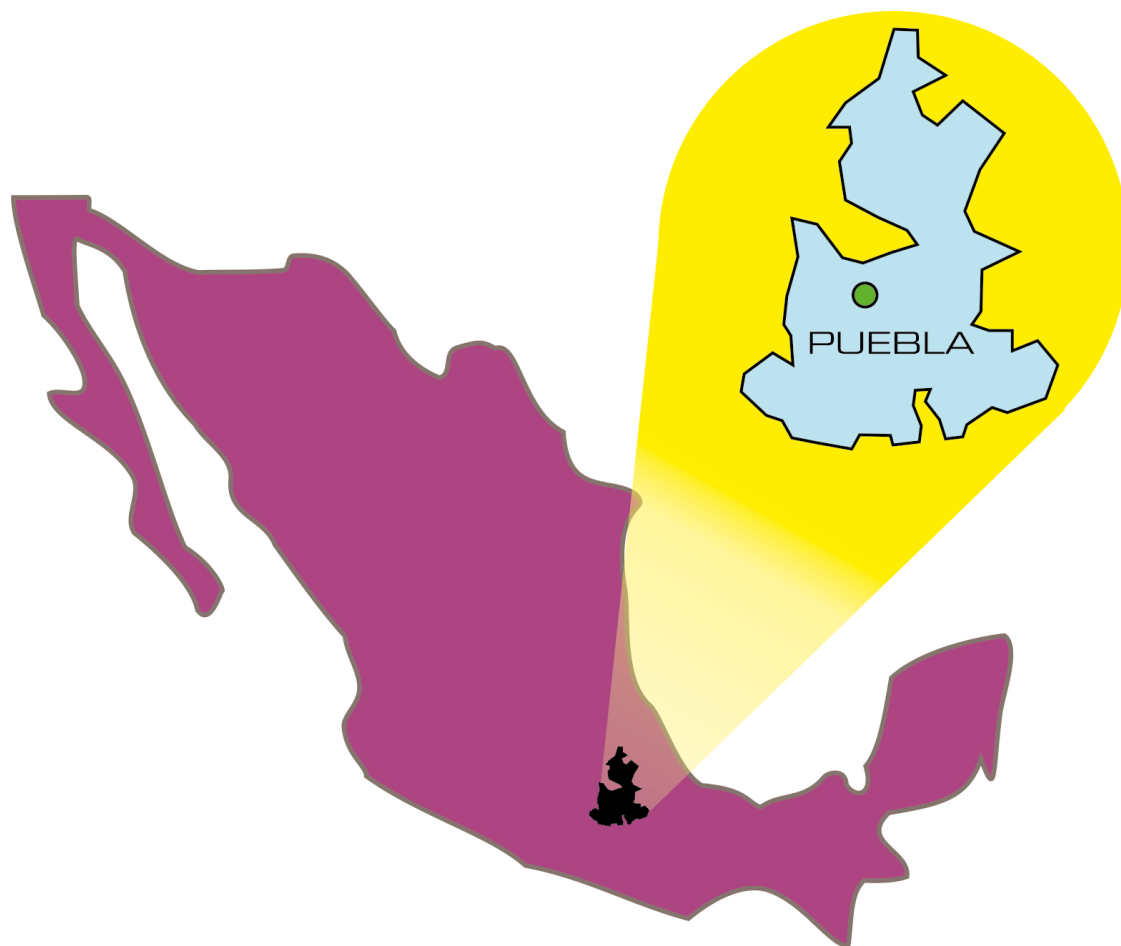
5. Situación actual de la contaminación atmosférica en el estado de Puebla

El estado de Puebla es uno de los 32 estados que conforman México. Cuenta con una extensión territorial de 34,251 km². Se encuentra ubicado en la región centro-este del país; colinda al norte con el estado de Hidalgo y Veracruz; al este con Veracruz; al sur con Oaxaca y Guerrero; al oeste con Morelos; y al noroeste con el estado de México y Tlaxcala (Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial [SMADSOT], 2023).

Puebla es un estado con gran riqueza natural, ya que tiene numerosos ríos y cuerpos de agua, además de cuantiosas montañas, valles y mesetas, destacando las sierras Madre Oriental, Norte, Negra y la Mixteca. En este estado se ubican distintas áreas naturales protegidas, como el Parque Nacional Izta-Popo, Parque Nacional La Malinche y la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán.

Según los datos más recientes del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el año 2020 se estimó una población de 6.6 millones de habitantes, convirtiéndolo en el sexto estado más poblado del país.

Figura 1.2. Ubicación del estado de Puebla en México



Fuente: Elaboración propia

Desde el 2000, Puebla cuenta con la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA), que busca monitorear los contaminantes atmosféricos en la zona conurbada de Puebla. Actualmente, la REMA está integrada por cinco estaciones de monitoreo (Agua Santa, Benemérito Instituto Normal del Estado, Ninfas, Universidad Tecnológica de Puebla y Velódromo). De estas estaciones se obtiene el Índice de Calidad del Aire (ICA) mediante la medición de Ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2) y material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$). El ICA se basa en las diferentes Normas Oficiales Mexicanas que establecen los valores límite de concentración permisibles para garantizar la protección a la salud humana (SMADSOT, 2023).

Figura 1.3. Contaminantes atmosféricos en la ciudad de Puebla



Fuente: Elaboración propia

Las principales fuentes de contaminación atmosférica se clasifican por su origen, natural o antropogénica. Dentro de las fuentes naturales, en Puebla destacan las emisiones del volcán Popocatepetl, el cual se ubica en los límites del estado de México, Puebla y Morelos. El volcán puede generar contaminación atmosférica durante las erupciones, las cuales pueden incluir gases volcánicos, partículas sólidas, cenizas y aerosoles.

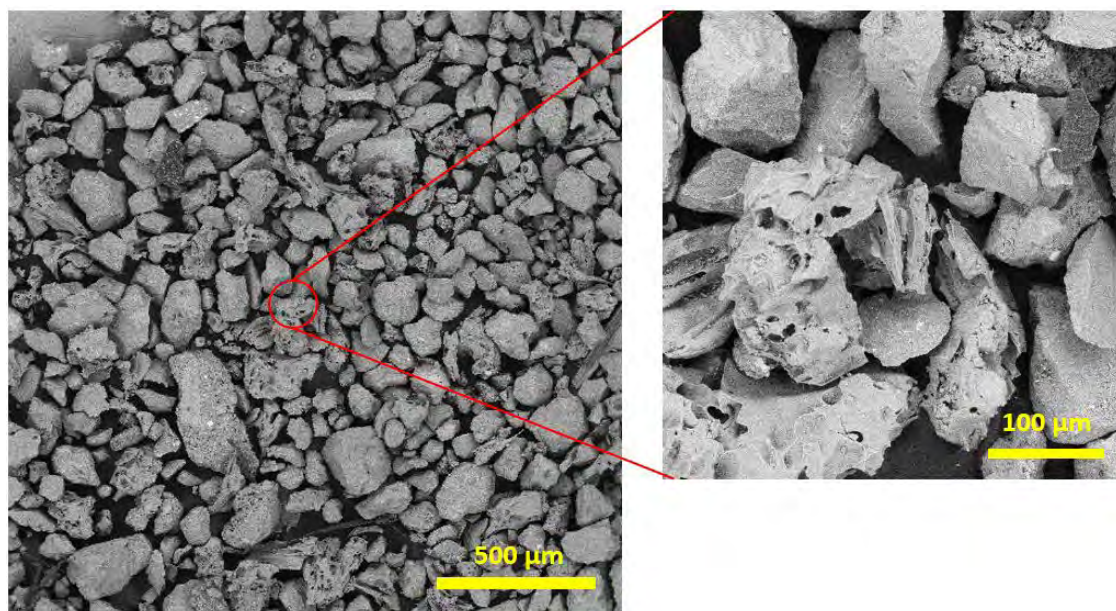
En México existen varios volcanes con un alto nivel de actividad, sin embargo, el Popocatepetl es el más activo (sirva mencionar que su nombre proviene del náhuatl y significa “montaña que humea”). A lo largo de más de medio millón de años ha mantenido una actividad volcánica constante, pero su periodo eruptivo actual comenzó el 21 de diciembre de 1994 y desde entonces su actividad no se ha detenido, experimentando múltiples erupciones explosivas que expulsan materiales y compuestos como:

- Gases volcánicos: Principalmente dióxido de azufre (SO_2), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2) y vapor de agua (H_2O). Diversos estudios científicos han logrado conocer más a detalle los componentes de las emisiones del volcán Popocatepetl y su contribución a la química atmosférica para así definir el impacto en la calidad del aire en las comunidades cercanas al volcán. Durante la actividad de marzo de 2006, se midió la emisión de SO_2 (siendo de 2.45 megagramos por día) y se definió la trayectoria de la pluma volcánica, reconociendo que en ese evento las zonas

más afectadas eran la ciudad de Puebla y Tlaxcala (Grutter *et al.*, 2008). En un evento más reciente, en 2019, se identificó mercurio en gas contenido en las emisiones del volcán Popocatepetl (Schiavo *et al.*, 2020).

- **Partículas sólidas y ceniza volcánica:** Durante la actividad eruptiva se pueden generar expulsiones de rocas y minerales, las cuales pueden ser transportadas a grandes distancias por el viento. De los materiales expulsados, se han identificado piedra pómez, escoria y vidrio volcánico, con partículas de distintos tamaños (Macías *et al.*, 2020). En 2016, un grupo de científicos logró caracterizar la ceniza del volcán, identificando elementos como aluminio (Al), calcio (Ca), hierro (Fe), sodio (Na), magnesio (Mg), manganeso (Mn), potasio (K), titanio (Ti), fósforo (P), azufre (S), estroncio (Sr), bario (Ba), zirconio (Zr), zinc (Zn), cromo (Cr), níquel (Ni) y cobre (Cu) (Shruti *et al.*, 2018). En la Figura 1.4 se muestra la ceniza del volcán Popocatepetl recolectada en Puebla durante la actividad volcánica de mayo de 2023. Se observan pequeñas partículas de ceniza menores a 500 μm , que pueden ingresar al cuerpo humano y afectar la salud de la población, en especial al sistema respiratorio (daño en los pulmones), provocando afecciones en la piel e irritación de ojos, nariz y garganta. Por esta razón, es importante que la población cercana al volcán tome medidas de protección: utilizar mascarillas adecuadas, mantenerse en interiores cuando sea posible y usar ropa que evite la exposición de la piel.

Figura 1.4. Microfotografía de la ceniza del volcán Popocatepetl



Fuente: Fotografías propias

- **Lluvia ácida:** Las emisiones de gases volcánicos que son ricos en azufre pueden reaccionar con la humedad de la atmósfera y formar ácido sulfúrico (H_2SO_4) y

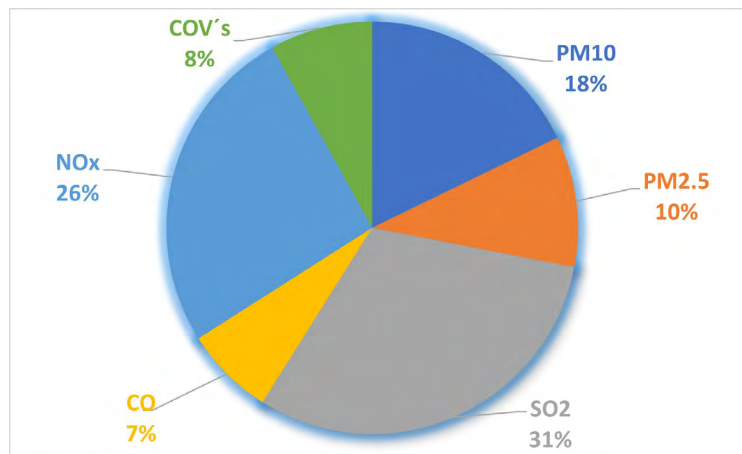
ácido nítrico (HNO_3). Dichos compuestos forman la lluvia ácida, la cual puede tener importantes efectos dañinos al medio ambiente y seres vivos, contaminando cultivos, vegetación o cuerpos de agua; así mismo, puede provocar efectos adversos en la salud de las personas, causando problemas respiratorios como tos y dificultad para respirar, además de afecciones cutáneas (Manahan, 2001).

Con relación a las fuentes de contaminación antropogénica, es decir, actividades humanas, estas se clasifican en fuentes fijas y móviles. Las fijas son aquellas instalaciones que tienen su ubicación establecida en una zona específica, por ejemplo, las industrias, mientras que las móviles se refieren a las emisiones provenientes de automóviles particulares, transporte de carga, aéreo y marítimo.

Las principales actividades industriales en el estado de Puebla se relacionan con el sector automotriz, autopartes, textil, química, construcción, agrícola, entre otras (Secretaría de Economía, 2023), y las emisiones se deben a los solventes utilizados en el recubrimiento de carrocerías, pintado, limpieza, así como por el uso de plaguicidas y fertilizantes.

De acuerdo con la información publicada por instancias gubernamentales (Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial, 2020), el SO_2 y los NO_x son los principales gases emitidos por fuentes fijas (Figura 1.5).

Figura 1.5. Principales contaminantes emitidos por fuentes fijas



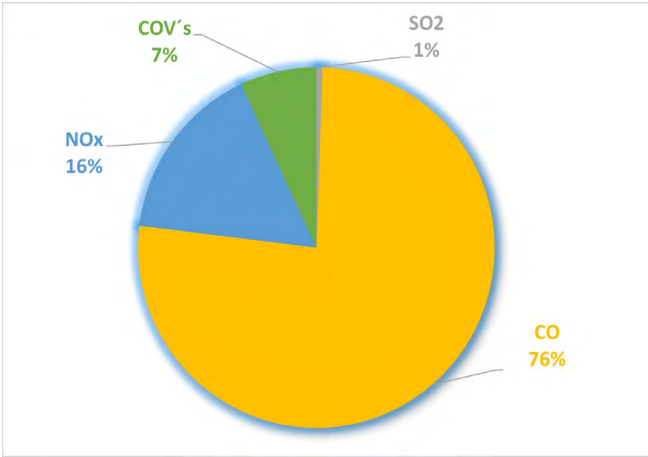
Fuente: Elaboración propia

Las industrias ubicadas en el estado de Puebla, cuyos procesos generan contaminantes atmosféricos como humos, gases, polvos o vapores, deben cumplir con los lineamientos establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, para mantener control de las emisiones atmosféricas

generadas por fuentes fijas. En cuanto a las fuentes móviles, en el estado de Puebla actualmente se tiene un registro de un millón y medio de vehículos automotores, incluyendo automóviles, camiones de transporte público y motocicletas (Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica del Estado de Puebla [CEIGEP], 2023). Lo anterior contribuye en las emisiones de CO y NOx, principales contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles, debido al uso de combustibles fósiles (Figura 1.6).

El 40% del parque vehicular del estado se encuentra en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla, por lo que se han establecido iniciativas, como el Programa de Verificación Vehicular, para intentar reducir la emisión de gases contaminantes proveniente de fuentes móviles. El proceso de verificación consiste en pruebas visuales (color del humo que expulsa el automóvil) y medición de emisiones (CO, NOx e hidrocarburos). Dependiendo de los valores obtenidos, se emitirá la certificación y el holograma correspondiente: 00, 0, 1 o 2 (Orden Jurídico Poblano, 2022).

Figura 1.6. Principales contaminantes emitidos por fuentes móviles



Fuente: Elaboración propia

6. Estrategias para mejorar la calidad del aire

Como se ha mencionado, la contaminación del aire ocurre por distintos factores, por ejemplo, erupciones del Popocatepetl, que al ser de fuentes naturales no se pueden evitar, no así las emisiones por fuentes antropogénicas. En este sentido, han surgido iniciativas y estrategias para fomentar la conciencia ambiental, hacer frente a sus desafíos y mejorar las condiciones del aire (Semarnat, 2016).

- Reducción de emisiones de vehículos automotores: A nivel mundial, este medio de transporte es el más utilizado, especialmente en áreas urbanas y países desarrollados. Su alta demanda ha contribuido en diversos problemas ambientales, emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de combustibles fósiles, contaminación del aire y congestión vial. Las alternativas para migrar a medios de transporte más ecológicos involucran el uso de bicicleta, vehículos eléctricos, mejorar el transporte público y caminar. En el caso de la bicicleta, los gobiernos de las grandes ciudades han adoptado políticas, estrategias e invertido en infraestructura para fomentar su uso, por lo que se ha observado un significativo crecimiento en los últimos años. La bicicleta es un medio de transporte versátil y sostenible que ofrece múltiples beneficios, tanto para la salud física (por el ejercicio que implica) como en términos de sostenibilidad ambiental (ya que no emite gases contaminantes), ayudando a reducir la contaminación atmosférica. Respecto a los vehículos eléctricos, estos no emiten gases contaminantes durante su funcionamiento gracias a que utilizan baterías recargables o sistemas de almacenamiento de energía eléctrica para alimentar los motores eléctricos; inclusive, la energía de recarga puede provenir de fuentes renovables, por lo que representan una alternativa ecológica de transporte. Los vehículos híbridos, por su parte, combinan un motor de combustión interna con uno o más motores eléctricos, ayudando a reducir el consumo de combustibles y, por consiguiente, las emisiones de gases a la atmósfera. El uso del transporte público también es una alternativa para reducir las emisiones contaminantes, ya que al tener más capacidad de pasajeros disminuye el número de vehículos en circulación y, en consecuencia, hay menos emisiones contaminantes. Por último, en la medida de las posibilidades de cada persona, cuando se trate de desplazamientos cortos, puede optarse por caminar en lugar de usar el automóvil. Esta es una acción benéfica, no solo para el medio ambiente, sino para la economía y salud de los habitantes.
- Uso de energías limpias: Las principales fuentes generadoras de energía eléctrica están basadas en la explotación de combustibles fósiles y utilizarlos representa altas emisiones de CO₂ y gases de efecto invernadero a la atmósfera, por lo que fomentar el uso de energías limpias contribuye a mitigar la contaminación atmosférica. Estas energías pueden ser: 1) solar, basada en el aprovechamiento de la radiación solar; 2) eólica, obtenida del viento mediante aerogeneradores o turbinas; 3) hidroeléctrica, que aprovecha el flujo de la caída de agua; 4) geotérmica, la cual aprovecha el calor del interior de la Tierra; y 5) oceánica, resultante de la fuerza de las corrientes marinas.
- Control de emisiones industriales: El control de emisiones industriales es vital para minimizar el impacto ambiental, por ello muchas industrias comprometidas con el cuidado del planeta han migrado sus procesos a tecnologías que permitan reducir las emisiones contaminantes, a través de instalar sistemas de filtración, usar catalizadores y mejorar la eficiencia energética al cambiar de energías convencionales a renovables. También implementan ajustes en sus

procesos para optimizar los recursos y minimizar residuos mediante tratamientos de aguas residuales, por ejemplo. Así mismo, existen normas ambientales que establecen los mecanismos para identificar, monitorear y controlar las emisiones de las distintas industrias; en dichas normas se establecen límites máximos permisibles de emisión de contaminantes atmosféricos.

- Creación de áreas verdes: Una de las estrategias que puede generar un impacto significativo en la mejora de la calidad del aire es contar con amplias áreas verdes, ya que favorecen la purificación del ambiente. Las plantas, mediante el proceso de fotosíntesis, absorben CO_2 y liberan oxígeno (O_2); además, las áreas verdes proporcionan sombra, reduciendo la temperatura ambiental, puesto que las calles pavimentadas y edificios pueden producir acumulación de calor. Una alternativa para el incremento de áreas naturales son las azoteas verdes y los jardines verticales. Los techos y paredes de los hogares pueden contribuir en la tarea de mejorar la calidad de aire que se respira. Distintas especies de vegetación se adaptan a estas condiciones de hábitat, es decir, interiores y exteriores; además, los sistemas pueden adoptar diferentes tamaños, formas, diseños y métodos de riego. Los beneficios de estos sistemas son múltiples: el embellecimiento del paisaje, ahorro de espacio, aislamiento térmico y, por supuesto, mejora de la calidad del aire.
- Educación ambiental: Muchas personas en el mundo han desarrollado una profunda conexión y respeto hacia la naturaleza. Su filosofía involucra la interconexión de todos los seres vivos, procurando su protección y armonía. Diversas tradiciones ancestrales han mantenido su relación de respeto con la naturaleza, sirviendo de ejemplo a las generaciones actuales para vivir de manera sostenible y en equilibrio con el entorno natural. Una manera de expandir esa ideología es mediante la educación ambiental, buscando promover la conciencia, valoración y protección de la naturaleza a través de experiencias de contacto con la biodiversidad. Se debe reconocer que la explotación y sobreexplotación de los recursos naturales ha llegado a límites sin precedentes, siendo un principal factor la cultura de consumo que impera en la actualidad, por eso es fundamental replantearse cuáles son los costos ambientales involucrados y cambiar a hábitos de consumo que sean más responsables y sostenibles. Para ello, los gobiernos de las grandes ciudades están impulsando programas de formación, capacitación, colaboración en proyectos comunitarios y campañas de comunicación y sensibilización.
- Monitoreo de la calidad del aire: El objetivo del monitoreo es contar con información precisa y actualizada sobre el nivel de contaminantes atmosféricos, lo que permite emitir comunicados de alerta a la ciudadanía o incluso actualizar las políticas en materia ambiental. Las estaciones de monitoreo están ubicadas en puntos estratégicos de las ciudades y están equipadas con instrumentos especializados para medir y analizar distintos contaminantes y otros parámetros meteorológicos, como temperatura, velocidad del viento y radiación solar.

- Nuevas tecnologías para combatir la contaminación atmosférica: Nuevas tecnologías basadas en nanomateriales comienzan a ser de gran interés para aplicaciones medioambientales, ya que presentan ventajas importantes en términos de reducción de costos, monitoreo en tiempo real de contaminantes, portabilidad y alta precisión. Algunos ejemplos son filtros de aire conformados por nanofibras que logran retener partículas más pequeñas que las $PM_{2.5}$; los catalizadores que permiten descomponer contaminantes gaseosos en otros menos tóxicos; los sensores que detectan concentraciones de distintos gases; o bien, los nanomateriales utilizados para la captura y eliminación de gases contaminantes. Estas nanotecnologías ayudan a mejorar la calidad del aire y reducir los impactos negativos en la salud humana y medio ambiente. En los siguientes capítulos se expondrán los conceptos generales sobre la nanotecnología y nanomateriales, e información sobre algunas de las tecnologías aquí mencionadas.

7. Conclusiones

Aunque la contaminación se da en todas las esferas ambientales (atmósfera, hidrósfera, biósfera, geosfera y antroposfera), este capítulo se centró en la contaminación atmosférica y las distintas fuentes que la generan. De igual forma, se proporcionaron algunas estrategias que permitirán contribuir en la titánica labor de mejorar la calidad del aire que se respira. La contaminación ambiental es un desafío global que requiere esfuerzos en conjunto de sociedad y gobierno, ya que es apremiante que se adopten medidas que reduzcan los impactos ambientales generados.

8. Referencias

- CEIGEP. (2023). *Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica del Estado de Puebla*. <http://ceigep.puebla.gob.mx/>
- Environmental Protection Agency. (2023). EPA. <https://www.epa.gov/>
- Grutter, M., Basaldud, R., Rivera, C., Harig, R., Junkerman, W., Caetano, E. y Delgado-Granados, H. (2008). SO₂ emissions from Popocatepetl volcano: Emission rates and plume imaging using optical remote sensing techniques. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(22).
- Macías, J. L., Arce, J. L., García-Tenorio, F., Sosa-Ceballos, G. y Gardner, J. E. (2020). Source and behavior of pyroclastic density currents generated by Vulcanian-style explosions of Popocatepetl volcano (Mexico) on 22 January 2001. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 406. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107071>
- Manahan, S. E. (2001). *Environmental chemistry*. Ed. Reverté.
- Orden Jurídico Poblano. (2022). *Programa de Verificación Vehicular Obligatoria para los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre de 2022*. <https://ojp.puebla.gob.mx/component/k2/itemlist/search?searchword=Programa+de+Verificación+Vehicular+Obligatoria+para+los+meses+de+Octubre%2C+Noviembre+y+Diciembre+de+2022>
- Schiavo, B., Morton-Bermea, O., Salgado-Martínez, E., Arellano, J., & Hernández-Álvarez, E. (2020). Estimates of mercury flux and temporal variability of Hg/SO₂ ratio in the plume of Popocatepetl volcano (Mexico). *Journal of South American Earth Sciences*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102614>
- Secretaría de Economía. (2023). *Secretaría de Economía, Gobierno de Puebla*. <https://se.puebla.gob.mx/>
- Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial. (2020). *Programa de Gestión de Calidad del Aire 2012-2020 del Estado de Puebla*. http://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/proaire/10_ProAire_Puebla.pdf
- Shruti, V. C., Rodríguez-Espinosa, P. F., Martínez-Tavera, E. y Hernández-González, D. (2018). Metal concentrations in recent ash fall of Popocatepetl volcano 2016, Central Mexico: Is human health at risk? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 162, 324-333. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.067>
- SEMARNAT. (2016) *Estrategia Nacional de Calidad del Aire*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/171917/SEMARNAT_-_Estrategia_Nacional_de_Calidad_del_Aire.pdf
- SMADSOT. (2023). *Secretaría de Medio Ambiente Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial*. <https://smadsot.puebla.gob.mx/>
- The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). IPCC. <https://www.ipcc.ch/>

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES SOBRE NANOTECNOLOGÍA Y NANOMATERIALES

Itzel Pamela Torres Ávila¹

1. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, C.P. 07340, México.

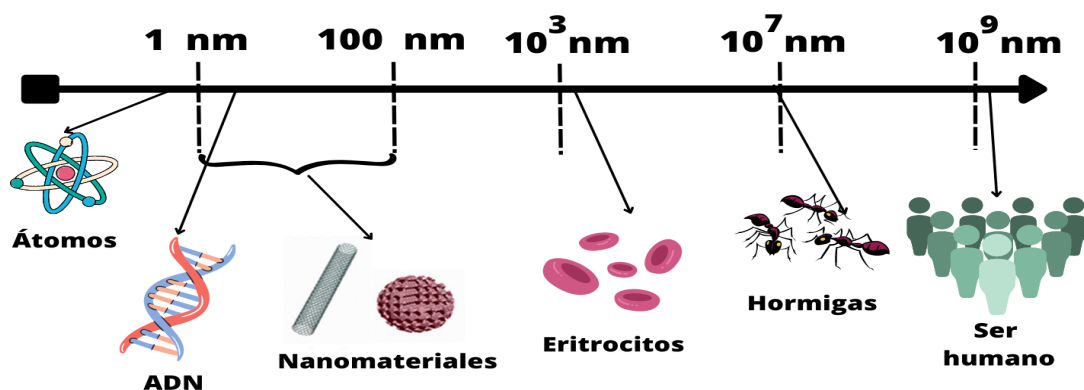
1. Introducción

El término nano deriva del griego *vávoç* que significa “enano” y es equivalente a una mil millonésima parte de una unidad de medida, por lo tanto, un nanómetro se refiere a un tamaño de 10^{-9} metros. Los materiales, a grandes rasgos, se pueden clasificar por su tamaño en primera instancia para sintetizarlos, modificarlos y caracterizarlos, observando su morfología y composición, así como sus propiedades mecánicas, ópticas, térmicas y electromagnéticas. Existen estructuras que por su tamaño no se pueden estudiar, analizar y manipular con ciertos equipos como un microscopio óptico dada su escala, este es el caso de los nanomateriales, definidos como “un material natural o manufacturado que contiene partículas en un estado no ligado o aglomerado, donde el 50% o más de las partículas tienen dimensiones en el rango de 1-100 nm” (Comisión de recomendaciones de la Unión Europea, 2011). este rango de tamaño es mejor conocido como nanoescala. En la Figura 2.1 se puede observar la comparación entre dimensiones.

Por otro lado, la nanotecnología se define como el estudio y aplicación de los nanomateriales y los sistemas compuestos por ellos. Este término fue utilizado por primera vez en 1974 por Norio Taniguchi en una conferencia en Tokio para referirse a los requisitos precisos para el mecanizado y acabado de los materiales (Anbusagar *et. al*, 2018). Previamente, ya se había hablado de la problemática para manipular y controlar cosas a una pequeña escala en una charla titulada “Hay mucho espacio en el fondo”, dada por

el Premio Nobel de Física Richard Feynman en 1959, considerado como uno de los más importantes pioneros en la nanotecnología. Sin embargo, este término se popularizó por el libro *Engines of creation* de K. E. Drexler (Drexler, 1986, p. 2).

Figura 2.1. Representación esquemática de distintas dimensiones y perspectiva de la escala nanométrica



Fuente: Elaboración propia

2. Presencia de la nanotecnología

En algunas ocasiones, la palabra nanotecnología ha sido usada erróneamente, ya que existe tecnología que usa sistemas dentro del rango de los micrómetros (>100 nm). La importancia de la nanotecnología radica en que es un campo multidisciplinario que requiere conocimientos sobre física, química, ciencia de los materiales, electrónica, biología, medicina y otras subramas de estas disciplinas; todo esto con la finalidad de entender las propiedades de los nanomateriales, debido a que su comportamiento se encuentra en la zona átomo-molécula. Por lo tanto, representa un gran desafío para el ser humano controlar estos materiales a nivel atómico. Es importante entender que los nanomateriales no son materiales desconocidos, sino formas a nanoescala de materiales que ya se conocen. Incluso existen nanoestructuras que se encuentran en la naturaleza, como en las plantas; por ejemplo, el proceso de fotosíntesis ocurre gracias a los pigmentos fotosensibles, que son moléculas a nanoescala de los tilacoides dentro de los cloroplastos, por mencionar un ejemplo.

También hay casos de tecnología del pasado que contiene nanomateriales sin que sus creadores lo supieran; por ejemplo, los romanos en el siglo IV hicieron una copa de vidrio llamada *Copa de Licurgo*, reconocida por ser el nanocompuesto sintético más antiguo, con la particularidad de que este material es dicróico (dos colores), es decir, la luz se absorbe de forma variable dependiendo de su plano de polarización. Esto fue detallado al realizarle un estudio por medio del microscopio electrónico de

transmisión (*Transmission Electron Microscope* [TEM por sus siglas en inglés]) por científicos en 1990, encontrando así nanopartículas de plata, oro y cobre dispersas de manera coloidal en el vidrio (Nunes et al., 2019). Así mismo, se concluyó que la absorción de luz en partículas más pequeñas permitía percibir en la copa el color rojo, mientras que la absorción en partículas más grandes permitía observar un color morado. Por su parte, Michael Faraday estudió estas preparaciones coloidales de metales como el oro, así como sus propiedades, desde 1857, determinando así su hipótesis: “el color del oro depende en cierto grado de la manera en que están formados” (Faraday, 1857). Adicionalmente, existían esmaltes cerámicos brillantes en el mundo islámico, los cuales llegaron a Europa entre los siglos IX-XVII, que contenían nanopartículas de plata y cobre. Otros hallazgos son algunas pinturas y cerámicas renacentistas que proporcionaban colores y ciertas propiedades cuyo origen se desconocía.

Avanzando en el tiempo, específicamente en 1931, los científicos Max Knott y Ernst Ruska inventaron el Microscopio Electrónico de Transmisión, lo que permitió explorar el mundo de la nanotecnología y poder comprobar su presencia en antiguas civilizaciones. Desde las primeras ideas de Feynman hasta la actualidad, se han hecho diversos avances tecnológicos para la rama de la nanotecnología, tanto para su desarrollo como su observación, por ejemplo; Rubert Curl, Harold Kroto y Richard Smalley descubrieron que el carbón puede existir también en forma esférica, como los fullerenos. Así mismo, se dedicaron a sintetizarlos en 1985. Adicionalmente, los físicos Gerd Binnig y Heinrich Rohrer inventaron el Microscopio de Túnel de Barrido (*Scanning Tunneling Microscope* [STM por sus siglas en inglés]), lo que les valió el Premio Nobel de Física en 1986. Dicho invento permitió el desarrollo de otros microscopios, como el de Fuerza Atómica (*Atomic Force Microscope* [AFM por sus siglas en inglés]). En avances más actuales, Jean-Pierre Sauvage, Sir J. Fraser Stoddart y Bernard L. Feringa obtuvieron el Premio Nobel de Química en 2016 por diseñar y sintetizar máquinas moleculares (Nunes et al., 2019).

3. Clasificación de los nanomateriales

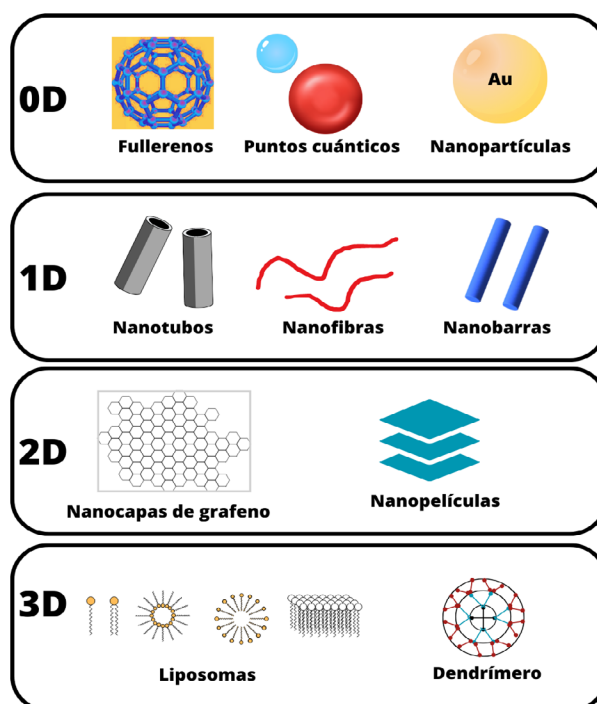
La principal clasificación de los nanomateriales está dividida por categorías dimensionales, las cuales se basan en el tamaño y forma (Amaya J., 2019). La descripción de cada categoría se muestra a continuación. Algunos ejemplos se pueden observar en la Figura 2.2.

- Dimensión cero (0D): es el tipo más común, donde sus tres dimensiones (x, y, z) se encuentran a nanoescala; por ejemplo: puntos cuánticos, nanopartículas esféricas, cúmulos o aglomerados atómicos (*clusters* por su término en inglés), fullerenos, nanoesferas huecas, etc.

- Unidimensional (1D): en esta categoría se tienen dos dimensiones (x, y) en nanoescala, porque la dimensión restante (z) se encuentra a mayor escala que la nanométrica; por ejemplo: nanotubos, nanoalambres, nanofibras, nanobarras, etc.
- Bidimensional (2D): los nanomateriales en esta categoría tienen una dimensión a nanoescala, mientras que las otras dos dimensiones están por arriba de la escala nanométrica; por ejemplo: nanocapas, nanodiscos, nano-recubrimientos, nanopelículas, etc.
- Tridimensional (3D): en esta última categoría, las tres dimensiones (x, y, z) exceden la nanoescala, pero contienen granulaciones de tamaño nanométrico o estructuras nanocristalinas; por ejemplo: películas muy delgadas con porosidad a nanoescala, nanocompuestos, liposomas, dendrímeros, etc.

Sin embargo, estas categorías no son las únicas para poder clasificar estructuras a nanoescala, también puede hacerse por su composición (nanopartículas de un solo material o de una compactación de diversos materiales), por su origen (orgánicos, inorgánicos o una mezcla de ambos; con este último se genera un híbrido donde sus interacciones envuelven el autoensamblado) o por su relación de aspecto (alta, como los nanocables, nanotubos, nanobarras y nanovarillas, cuyo diámetro varía en su longitud; o baja, como los polvos, las esferas, cubos y pirámides).

Figura 2.2. Ejemplos de cada una de las categorías dentro de la clasificación dimensional de los nanomateriales



Fuente: Elaboración propia

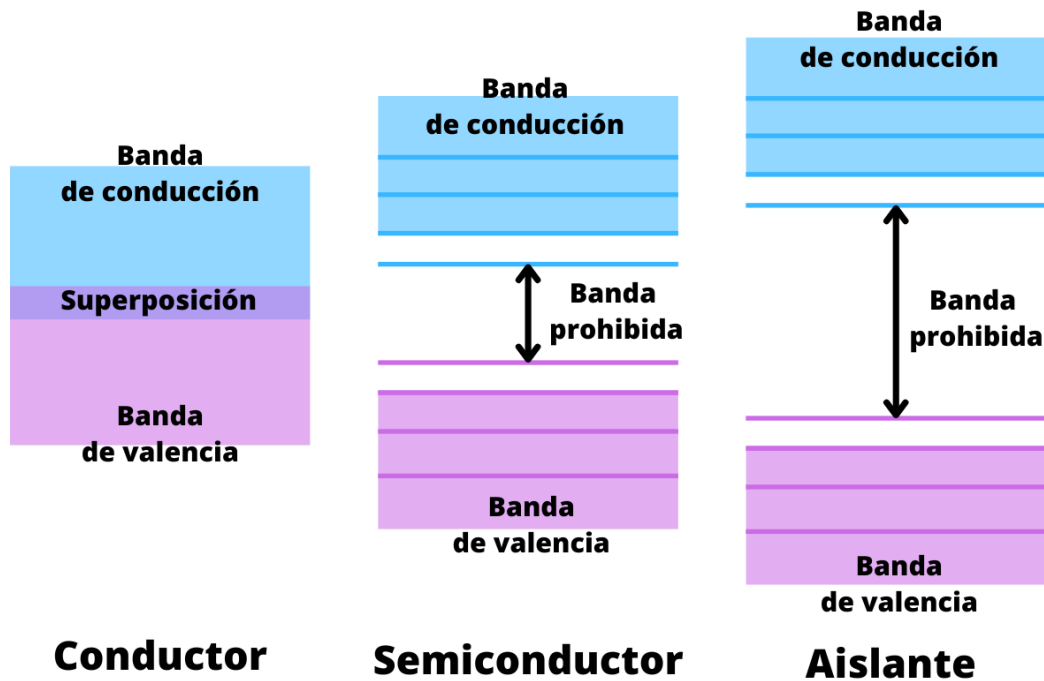
4. Propiedades de los nanomateriales

Existen diversas propiedades de los nanomateriales que son de gran interés para varias disciplinas de la ciencia; en este capítulo se mostrarán las más importantes.

- Área superficial: cuando el tamaño de los materiales se reduce hasta llegar a la nanoescala, la cantidad de átomos en la superficie aumenta, lo que le proporciona una mayor reactividad, es decir, su tamaño conduce a un aumento de su área superficial con relación al volumen (Tawfik, 2023).
- Propiedades mecánicas: debido a la gran área superficial, se pueden obtener productos con mayor flexibilidad y resistencia modificando su estructura y cristalinidad.
- Carga superficial: dentro de las propiedades funcionales de los nanomateriales, se encuentra la carga superficial que ayuda a definir su estabilidad, agregación, es decir, su aglomeramiento, y la actividad con su entorno. Esta carga se mide con la potencial zeta, que representa el grado de repulsión electrostática entre nanopartículas; cuanto mayor sea la magnitud de este potencial mayor será la estabilidad coloidal, por lo tanto, menor la aglomeración (Tawfik, 2023).
- Actividad catalítica: esta propiedad se debe a que los nanomateriales contienen un mayor número de átomos superficiales insaturados, lo cual aumenta la densidad de enlaces colgantes, incrementando así su energía superficial y reaccionando con sustancias del exterior, mientras intenta reducir su energía superficial.
- Actividad magnética: las nanopartículas magnéticas pueden clasificarse, según su respuesta, en ferromagnéticas o superparamagnéticas. Por ejemplo, ciertos diámetros de las nanopartículas magnéticas tienen una respuesta similar a la de los materiales paramagnéticos, es decir, con capacidad de alinearse de manera paralela a un campo magnético aplicado. Dentro de esta propiedad, se puede clasificar su funcionamiento de la siguiente manera (Ibrahim M. *et al.*, 2021):
 - Ferromagnéticos: este tipo de nanomateriales contiene una gran cantidad de átomos con momentos magnéticos de forma paralela, por lo tanto, el momento magnético neto es cero debido a esa orientación.
 - Paramagnéticos: en este caso, los átomos se alinean dependiendo de la dirección del campo magnético aplicado; varios nanomateriales con esta propiedad son utilizados en el campo de la biomedicina para el diagnóstico médico.
 - Diamagnéticos: este tipo de nanomateriales es opuesto a los dos casos anteriores, ya que sus átomos no tienen electrones desapareados. Sumado a esto, son independientes a la temperatura, por lo tanto, su efecto es débil.

- **Antiferromagnéticos:** dentro de estos nanomateriales se tienen dos átomos en diferentes posiciones, por lo que los momentos magnéticos opuestos darán como resultado un momento magnético neto de cero.
- **Propiedades térmicas:** el transporte térmico en los materiales se hace mediante los fonones y los electrones libres, pero a medida que la escala baja aparece efectos de confinamiento cuántico y dispersión, ya que se provoca un cambio en las frecuencias de los fonones, lo que conduce al aumento de la velocidad de propagación. La disminución de la temperatura de fusión aparece a la par de la disminución del tamaño de la partícula; esta consecuencia termodinámica se debe a la relación superficie/volumen (Tawfik, 2023).
- **Propiedades ópticas:** esta propiedad depende de la interacción de la luz con los nanomateriales; así mismo, se puede modificar gracias a su quiralidad, por ejemplo, la absorción de la luz, dispersión de Rayleigh, fluorescencia, etc. En este caso, pueden ocurrir dos fenómenos donde un fotón puede ser absorbido, creando así un hueco en la banda de valencia cuando un electrón salta a la banda de conducción. Por otro lado, si este electrón regresa a la banda de valencia, libera un fotón con una energía igual a la brecha del semiconductor. Este proceso está asociado a la formación de un excitón, por lo tanto, tiene libre movimiento a través del material. Esto puede ser visible al ojo humano como el efecto de fotoluminiscencia en el cambio de azul a rojo emitido por los puntos cuánticos, debido al aumento en el tamaño de la nanopartícula (Adewale Adewy et al, 2021).
- **Propiedades eléctricas:** el movimiento de los electrones dentro de las nanopartículas se ve restringido y como consecuencia se tiene la cuantificación de la energía de los electrones. En este caso, dependiendo del dopaje que se le coloca, cada nanopartícula se puede comportar como conductor, semiconductor o aislante al aplicar cierto voltaje, como se puede observar en la Figura 2.3, lo que está totalmente relacionado con la anchura de su banda prohibida o mejor conocida como *band gap*. Esta brecha entre bandas es una de las contribuciones de la mecánica cuántica y se puede definir como la diferencia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción. Por lo tanto, esta banda prohibida en el caso de los semiconductores es la mínima energía necesaria para excitar a un electrón para que participe en la conducción (Tawfik, 2023).

Figura 2.3. Banda prohibida (*band gap*) dependiendo si el material es conductor, semiconductor o aislante



Fuente: Elaboración propia

5. ¿Cómo se fabrican los nanomateriales?

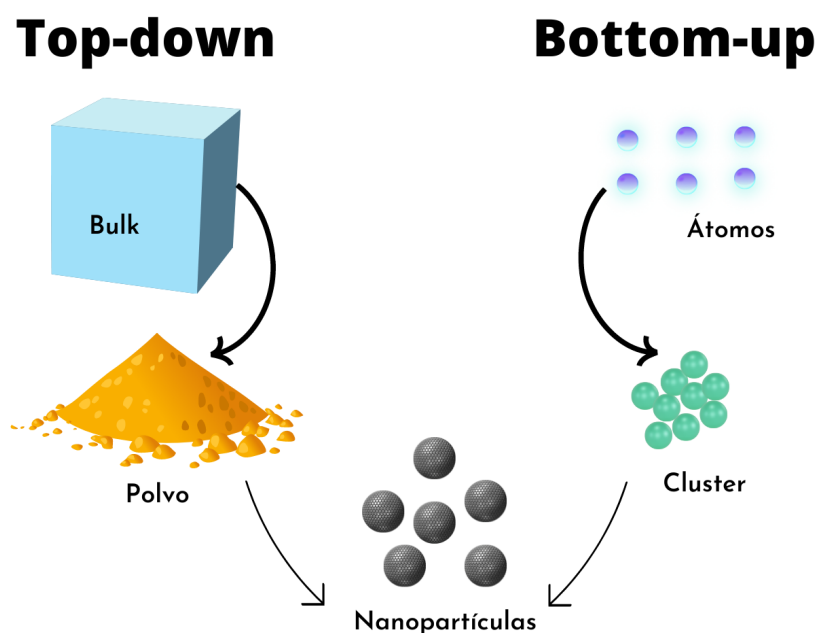
La nanofabricación consta de procesos y métodos ingenieriles de construcción de materiales nanoestructurados y de dispositivos en dimensiones menores a 100 nm que a su vez dependen de la aplicación de estos para su proceso de fabricación, ya sea una necesidad, la precisión atómica o que mejore algunas propiedades ópticas, mecánicas y/o electromagnéticas. En general, los métodos de nanofabricación que se mencionan en esta sección se dividen en dos categorías: “de arriba hacia abajo”, mejor conocido como *top-down* y “de abajo hacia arriba”, conocido como *bottom-up* (Namra Abid et al., 2022). En la Figura 2.4 se esquematiza cada método.

El término *top-down* se refiere a la producción de nanomateriales a partir de un enfoque global, es decir, de un material en su tamaño a granel (o por su término en inglés en tamaño *bulk*) que se va reduciendo de tamaño mediante diversos procesos de mecanizado, fracturamiento, grabado o litografía hasta llegar la formación nanoestructuras. Estas herramientas de nanofabricación tienen parámetros experimentales

que se controlan de manera externa para obtener la forma y dimensiones deseadas. Algunos de los métodos más comunes son:

- Molienda: es un método mecánico, el cual con ayuda de unas esferas de alta energía gira un molino para reducir minerales o metales desde su presentación en *bulk* sin alterar su composición a nanopartículas. Este método es accesible, además de que se pueden compactar y sintetizar estas nanopartículas para la fabricación de productos, por lo tanto, es el más utilizado a nivel industrial (Sebastián, 2018).
- Litografía: la litografía se ha empleado desde hace décadas para la impresión de circuitos integrados para ordenadores. Primero se tiene una plantilla y se estampa formando así un patrón que es reproducible. Existen diferentes tipos de técnicas de litografía, por ejemplo, la fotolitografía, la litografía por haz de electrones, la litografía suave, la litografía por iones enfocados y la litografía de pinza. En el caso de la litografía suave, tiene una gran ventaja, ya que no requiere de un cuarto limpio para su proceso con un molde reutilizable (Sebastián, 2018).
- Pulverización catódica (*sputtering*): es una técnica basada en la deposición física de vapor, la cual consiste en la liberación de átomos o iones de un material objetivo por medio del bombardeo con iones de alta energía. Los átomos se condensan sobre un sustrato (Jaramillo-Raquejo, 2020).

Figura 2.4. Representación esquemática de los métodos de fabricación *top-down* (de arriba hacia abajo) y *bottom-up* (de abajo hacia arriba)



Fuente: Elaboración propia

- El término *bottom-up*, que a grandes rasgos se refiere al uso de átomos o moléculas pequeñas como bloques de construcción, ensamblados o autoensamblados para generar sistemas más complejos; esto basado en mecanismos y tecnologías más especializadas. Esta categoría de nanofabricación es prometedora, ya que puede evitar el desperdicio de material no utilizado. A continuación, se explican los métodos más utilizados dentro de esta categoría (Namra Abid et al., 2022):
- Deposición química de vapor: en el proceso se tiene una mezcla de gases que reaccionan y se ponen en contacto con la superficie a recubrir, depositando así una capa densa de un metal o compuesto. El depósito puede ser mediante la reacción entre los gases o de los gases con la superficie del sustrato; estos recubrimientos suelen ser nanocristalinos o amorfos (Sebastián, 2018).
- Sol-gel: los principales materiales de partida pueden ser sales metálicas inorgánicas o compuestos metal-orgánicos, los cuales se someten a una reacción de polimerización para crear una suspensión coloidal (sol), mantenidas dispersas con la adición de un surfactante. Posteriormente, se puede tratar la suspensión y desactivar el surfactante para obtener una red extendida de nanopartículas (gel) para cubrir un sustrato (Borja-Borja, 2020).
- Hilado: esta técnica, mejor conocida como *spinning*, está basada en una solución con los materiales de interés y solventes en un reactor, para posteriormente pasarlos a un disco de rotación, el cual por la fuerza centrífuga va formando una fina capa donde la evaporación y una reacción química controlada generan la formación de nanopartículas (Duque-Sánchez, 2013).
- Pirólisis: los materiales de interés son sometidos a altas temperaturas junto con un gas inerte, evitando así su oxidación, por consiguiente, se evaporan estos materiales y, posteriormente, se condensan en forma de nanopartículas sobre un sustrato que se encuentra en una zona más fría.

6. Caracterización de nanomateriales

De manera general, las técnicas de caracterización permiten establecer una relación entre la estructura, morfología y composición química de los materiales. En este campo de la nanotecnología son necesarios equipos más específicos, como es el caso de los microscopios que utilizan un haz de electrones generados por dos tipos de fuentes: los emisores termoiónicos y de emisión de campo. Una vez generado ese haz de electrones, se concentra y acelera hacia la muestra, donde la imagen producida está relacionada al tipo de interacción del electrón con la muestra; este es el caso del Microscopio Electrónico de Barrido (*Scanning Electron Microscope* [SEM por sus siglas en inglés]), el Microscopio Electrónico de Transmisión (TEM) y sus derivados. El SEM utiliza electrones secundarios para obtener una imagen que revela la topografía superficial, mientras que los electrones retrodispersados, al penetrar más

profundamente en las muestras, proporcionan un contraste que varía según el material (Inkson B.J., 2016); así mismo, se pueden identificar los elementos que contiene la muestra en una técnica analítica llamada Espectroscopia de Energía Dispersiva (*Energy Dispersive Spectroscopy* [EDS por sus siglas en inglés]). En el caso del TEM, se utilizan los electrones transmitidos, así como los que son dispersados inelástica y elásticamente; cuenta con un modo imagen y un modo de difracción. El modo de difracción puede informar si un material es cristalino o amorfo, debido a que los materiales cristalinos al tener un arreglo y espacio regular entre átomos hace que los electrones se dispersen desde planos atómicos paralelos al haz de electrones que se les incide (Senthil Kumar *et al.*, 2019).

Adicionalmente, existen microscopios que emplean una sonda de exploración como el Microscopio de Efecto Túnel (STM) y el Microscopio de Fuerza Atómica (AFM). El STM se basa en el uso de una punta conductora que aplica un voltaje entre la punta y la muestra. Esta punta se encuentra conectada a un dispositivo de posición tridimensional impulsado por transductores piezoeléctricos; cuando la punta se acerca a 1 nm a la muestra hace que los electrones logren atravesar la brecha y se produzca una corriente, la cual se usa para formar la imagen. Por otro lado, el AFM consta de un brazo mecánico que sostiene una punta con la cual se detecta y mide la fuerza atómica; esto depende de la amplitud, fase y frecuencia de vibración del brazo (Khaled Parvez, 2019). En consecuencia, las fuerzas desvían la punta de la superficie de la muestra, generando así una imagen.

La espectroscopia es otra técnica de caracterización que a partir de la interacción de la luz con la materia se puede obtener información de la estructura química y atómica de los nanomateriales. Existen de diversos tipos, pero se mencionan las más importantes. En primer lugar, se tiene la Espectroscopia por Infrarrojo (*Infrared* [IR por sus siglas en inglés]), donde se expone una muestra a luz infrarroja incidente. La luz que no fue absorbida por los grupos de átomos de la muestra se transmite hasta a un detector, en el cual se analizan y se determinan las frecuencias absorbidas por el material. Dependiendo del tipo de átomos y enlaces entre ellos, la frecuencia vibracional es única para cada arreglo y así se pueden identificar los elementos analizados (Velandia J., 2017).

La Espectroscopia Raman es similar a la IR. Es un hecho que son complementarias, en este caso se usa como fuente un láser. Sin embargo, la luz es dispersada, ya sea mediante la dispersión de Rayleigh, donde se tiene la misma frecuencia e intensidad que el haz incidente, o la dispersión Raman, con una intensidad menor en frecuencias más altas y bajas que el haz incidente. A esto se le atribuye el desplazamiento de la frecuencia de cierto grupo de átomos con respecto al haz incidente (Castro J. *et al.*, 2013).

Para conocer la cristalinidad de un material, la técnica ideal es la Difracción de Rayos X (X-Ray Diffraction [XRD por sus siglas en inglés]) basada en la ley de Bragg. En esta técnica, la longitud de onda de los rayos X es cercana al espacio entre los átomos, por lo tanto, son dispersados por sólidos cristalinos. La interacción de los rayos X con los átomos del material ocurre simultáneamente. Como resultado, es necesario considerar los rayos que interfieren de manera constructiva, ya que se sumarán, o de manera destructiva, puesto que se cancelarán entre sí, con el fin de evitar su detección. Adicionalmente, la posición de los átomos dentro de la celda unitaria está relacionada con el factor de la estructura cristalina (Klinkova A. *et al*, 2024).

7. Aplicaciones de los nanomateriales

Los nanomateriales tienen una gran variedad de aplicaciones por su selectividad y reactividad, debido a su gran área superficial en términos de tamaño y movilidad, así como los efectos cuánticos que proporcionan a diferencia de un material *bulk*.

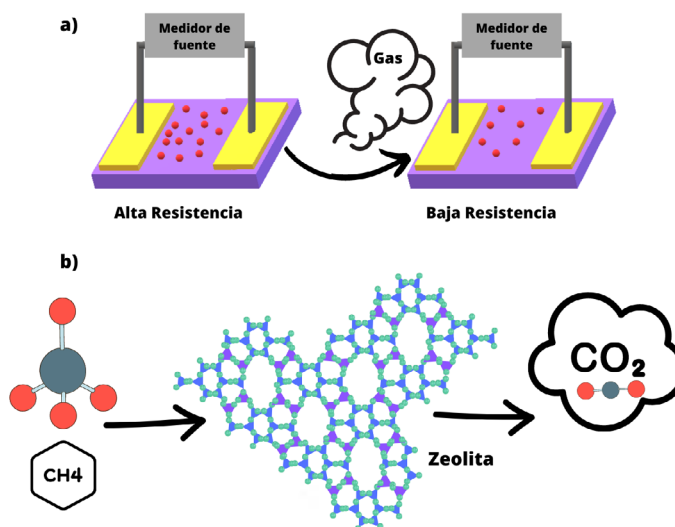
I. Aplicaciones ambientales

Los nanomateriales resultan ser unos potenciales candidatos para remover los contaminantes del ambiente por su bajo costo y por su tamaño. Para comprender los tipos, concentraciones y distribución de los contaminantes ambientales que se puedan encontrar en el aire, agua o suelo es necesario utilizar un dispositivo de monitoreo, con la finalidad de poder presentar una solución específica para cada problema. En este aspecto se han mostrado sensores químicos basados en nanotubos o nanocables, cuyos cambios están relacionados con sus propiedades eléctricas, es decir, algo medible como su cambio de resistencia al captar un compuesto químico, como se puede observar en la Figura 2.5a. También, la tecnología fotocatalítica puede ser activada mediante la radiación ultravioleta sobre un catalizador, como los nanotubos de óxido de titanio (TiO_2), que promueven la producción de radicales hidroxilos altamente reactivos con la finalidad de transformar a ciertos contaminantes con compuestos orgánicos volátiles a una forma menos tóxica (Nevaréz-Martínez M., 2017).

En el caso de las nanopartículas sintetizadas de agentes biológicos, los polímeros pueden evitar o disminuir su toxicidad a ciertos organismos, los cuales se utilizan para encapsular contaminantes hidrofóbicos. Una de las aplicaciones ambientales más importantes es el mejoramiento de la calidad del aire, como es el caso de los sistemas de adsorción, donde se usan nanomateriales adsorbentes como los nanotubos de carbón activado para capturar compuestos orgánicos volátiles por su porosidad y su relación volumen-superficie. Además, resulta fácil liberar o desorber lo capturado mediante calor o vacío. Las zeolitas son excelentes adsorbentes que contienen poros

dentro de la nanoescala; además, de manera uniforme es un material de carácter hidrofílico que contiene aluminio, que al liberarse se hace de carácter hidrofóbico y, por lo tanto, muy afín a compuestos orgánicos volátiles como los gases que provocan el efecto invernadero. Las zeolitas dentro de sus tantas aplicaciones industriales también pueden convertir un gas dañino como el metano en uno menos dañino como el dióxido de carbono (Parada J. *et al.*, 2016), como se puede observar en la Figura 2.5b.

Figura 2.5. Representación esquemática de aplicaciones ambientales. (a) Sensor de un gas basado en la resistencia al hacer pasar una diferencia de potencial y (b) captación de metano (CH_4) por una zeolita para ser convertido en dióxido de carbono (CO_2)



Fuente: Elaboración propia

La potabilización del agua también ha sido una rama de investigación que va desde el uso de nanomateriales fotocatalíticos hasta el mejoramiento de membranas para el filtrado. Existen varios purificadores de agua en el mercado, pero se han desarrollado recientemente purificadores electrónicos basados en la captación iónica. Este proceso se lleva a cabo en un capacitor que contiene dos placas que representan su ánodo (positivo) y su cátodo (negativo) por donde fluye agua; dependiendo de su carga, cada placa atrae los iones. Los nanomateriales pueden ayudar a hacer más eficientes las placas del capacitor, al aumentar la conductividad y la atracción de los contaminantes. Los iones se desechan mediante el cambio de polaridad del ánodo y del cátodo, permitiendo así que este proceso sea reproducible en cada ciclo (Durán J., *et al.* 2021).

II. Aplicaciones farmacéuticas y médicas

A lo largo de este capítulo se ha mencionado que existen diversas estructuras a nanoescala con distintas características. Un ejemplo de ello de manera general para el caso de aplicaciones médicas o farmacéuticas son las nanopartículas conjugadas con ligandos biológicos que se pueden unir a células particulares y liberar fármacos en un sitio blanco. Adicionalmente, las proteínas se pueden unir a nanocables o nanotubos para poder medirlas, ya que la conductividad de estos nanomateriales cambia y, por consiguiente, es detectable. Existen varias biomoléculas que se emplean para funcionalizar nanopartículas o dendrímeros para detectar un tipo particular de proteínas o sustancias características de una enfermedad; de igual forma, pueden ser funcionalizadas con marcadores fluorescentes usados en imagenología para el diagnóstico de enfermedades, así como para el reconocimiento de marcadores moleculares dentro de ciertas células con el uso de óxidos metálicos superparamagnéticos detectados mediante imagen por resonancia magnética (Haleem A., *et al.*, 2023).

Otros avances en esta área se centran en la liberación de sustancias en lugares específicos dentro del cuerpo humano, ya que los nanomateriales se pueden usar como acarreadores de fármacos debido a la forma en la que están funcionalizados, su tamaño o carga superficial (Alcalá-Alcalá, 2021). Las nanopartículas mesoporosas de sílice son un ejemplo de ello. Debido a su gran área superficial con estructura porosa, pueden funcionar como un vehículo de fármacos para enfermedades como diabetes o cáncer, así como en problemáticas en tejidos de huesos y tendones. Es sabido que la entrada más común de fármacos al sistema es por la vía oral, dado que es menos costosa y más sencilla, por lo tanto, se considera que pueda haber nanopartículas biodegradables, pero que sobrevivan hasta llegar al sitio de acción; en este caso, las nanopartículas basadas en polímeros han sido de gran interés, tales como polietilenglicol (PEG), recubiertas de ácido poliláctico (PLA por sus siglas en inglés) que pueden encapsular proteínas y pasar a través de la mucosa nasal o gastrointestinal.

Recientemente, la comunidad científica se ha centrado en los liposomas y micelas, encapsulando compuestos como la insulina o agentes quimioterapéuticos para enfermedades como el cáncer, donde su funcionalización superficial se hace mediante fragmentos de antígenos. A su vez, se necesita un control de estas estructuras a nanoescala para llegar a un blanco; esto se hace mediante señalamientos físico-químicos como el pH, la temperatura, un campo magnético, potenciales redox o la sensibilidad fotodinámica. La ventaja de estos nanosistemas es su alta biocompatibilidad, a diferencia de las nanopartículas metálicas, debido a que su síntesis está basada en lípidos y su capacidad de encapsulamiento, con la finalidad de ser un vehículo de diversos compuestos (Sim S, *et al.*, 2021).

Las nanopartículas por su tamaño pueden penetrar tejidos y mejorar la captación de los fármacos por las células, por lo tanto, son buenos candidatos para la entrega de

antígenos como adyuvantes y como imitadores de los virus. En este caso, los adyuvantes mejoran la respuesta del sistema inmunológico con una menor cantidad de antígeno suministrado. De manera similar, hay nanopartículas de silicio que son capaces de liberar antígenos de una manera controlada en un sistema *in vivo*.

Por último, existen biomateriales dentro de la nanoescala que permiten el mejoramiento de los dispositivos biometálicos implantables como en las prótesis osteoarticulares. Un ejemplo de estas mejoras superficiales de los biomateriales son los nanotubos de óxido de titanio (TiO_2) que se pueden formar en la superficie del sustrato, en este caso de titanio o una de sus aleaciones, permitiendo así un espacio nanoporoso que se encontrara en contacto directo con las células del tejido óseo; de esta forma, se promueve la osteointegración y, en consecuencia, aumenta la vida útil de las prótesis convencionales (Moreno B., 2009).

III. Aplicaciones electrónicas

Los sistemas electrónicos e informáticos están basados en el uso de las estructuras de los transistores, es decir, sus conceptos y aplicaciones básicas no han cambiado, pero siempre se pueden mejorar. Dentro de los sistemas informáticos, la nanotecnología juega un papel muy importante, por ejemplo, en la producción de memorias y sensores. Como se ha mencionado, las propiedades eléctricas de los nanomateriales son superiores a las de los materiales en *bulk*, tales como su capacidad de respuesta, gran estabilidad, su tamaño y la capacidad de interconexión con otros sistemas.

Un ejemplo de ello son los transistores de efecto de campo (FET por sus siglas en inglés) que tienen una gran adaptabilidad y compatibilidad con otros dispositivos debido a que incluyen nanomateriales, adaptando así su tamaño de portabilidad. Por lo tanto, cuantos más transistores por unidad de área haya en un procesador mayor será la velocidad total de funcionamiento; especialmente cuando se usan nanotubos de carbono, ya que son altamente conductores y se pueden sintetizar de forma “de abajo hacia arriba” o *bottom-up*, logrando superar el rendimiento de los transistores de silicio.

Sin embargo, el futuro de la nanotecnología en estos dispositivos no se queda en el uso de los nanomateriales, sino en el conocimiento que se va adquiriendo a nivel cuántico; por ejemplo, se considera que los dispositivos de electrón único son los principales candidatos para cambiar la tecnología convencional. Pueden ser utilizados para circuitos lógicos y de memoria progresiva, ya que consumen poca energía. Por otro lado, los transistores de efecto de campo de túnel (TFET por sus siglas en inglés) tienen una estructura cercana a la de un transistor de efecto de campo semiconductor de óxido metálico (MOSFET por sus siglas en inglés), es decir, usa el efecto túnel banda a banda (Ratnesh *et al.*, 2021).

8. Conclusiones

El ser humano y el ambiente en el que vive están expuestos a nanoestructuras naturales y artificiales encontradas en el suelo, en el aire, en el agua o en la comida, que en algunos casos pueden tener efectos adversos. Para determinar si estas nanoestructuras cumplen con los criterios para ser consideradas tóxicas es necesario conocer su destino, naturaleza y comportamiento en ese ambiente haciendo pruebas biológicas y técnicas de caracterización fisicoquímicas. El estrés oxidativo es la primera manifestación de toxicidad en las células y puede ser inducido por nanopartículas que entran a un organismo, causando alteraciones en la membrana mitocondrial que conlleva daño o muerte celular, procesos inflamatorios, patologías o genotoxicidad.

La principal forma en la que las nanopartículas ingresan al cuerpo humano es mediante la respiración, al ser inhaladas, abriéndose paso a través de los pulmones con el proceso de difusión, como es el caso de los estudios hechos sobre los nanotubos de carbono y sus efectos adversos a nivel pulmonar. Como ya se ha mencionado, existen contaminantes producidos por problemas ambientales, por ejemplo, los provenientes de los procesos de combustión, donde se liberan partículas de un tamaño de 50 nm desde el escape de un vehículo, o las nanopartículas provenientes de polvo y ceniza de una erupción volcánica como fuente natural. Es de gran importancia conocer que la precipitación de las nanopartículas en los pulmones dependerá de su tamaño y de la tasa de flujo de inhalación, por lo tanto, una distribución masiva y regular conduce a una mayor toxicidad; así mismo, promueve el transporte de sustancias tóxicas.

Otro medio de interacción de las nanopartículas es mediante el órgano más grande del cuerpo humano: la piel; en recientes investigaciones se ha expuesto que es la segunda fuente de absorción de estos compuestos a nanoescala; mientras más pequeñas las nanopartículas más fáciles es que penetren a las células como es el caso de las nanopartículas de óxido de titanio o zinc que se encuentran en productos cosméticos. Cuando las nanopartículas de óxido de titanio se encuentran por debajo de los 20 nm y con una estructura de anatasa por su alta actividad fotocatalítica, pueden inducir el estrés oxidativo. Además, existen estudios recientes no concluyentes sobre la genotoxicidad de los nanomateriales, es decir, pueden producir aberraciones cromosómicas, formación de micronúcleos o daño oxidativo al ADN.

Sin embargo, en las primeras pruebas reportadas muestran ejemplos de nanopartículas de plata de un tamaño de 20 nm inmersas en un medio de cultivo con células hepáticas, las cuales indujeron la producción de micronúcleos; caso contrario de las nanopartículas de plata de 50 nm que no mostraron tal efecto. Por otro lado, es de suma importancia conocer el fin de cada nanomaterial sintetizado si se quiere utilizar como acarreador de fármacos; por ejemplo, las nanopartículas metálicas como el oro o

la plata carecen de un mecanismo de eliminación metabólica en el cuerpo. En consecuencia, se ha observado que tienen una tendencia a acumularse en órganos específicos, como el hígado.

Adicionalmente, es necesario identificar los posibles impactos ambientales con relación a la producción de nueva tecnología y la síntesis de nanomateriales. Los productos finales y residuos pueden contaminar el entorno y perturbar el desarrollo de los organismos, ya sea flora o fauna que lo habitan. Como se ha mencionado anteriormente, los nanomateriales tienen propiedades fisicoquímicas que las hacen más reactivas, y mientras más pequeñas sean, más efectos tienen sobre estos organismos, ya que pueden penetrar hasta las células. Teniendo en cuenta que las células están cubiertas de una membrana lipídica, pueden llegar a ser destruidas por la carga de ciertas nanopartículas.

Otra problemática ambiental es la presencia de nanopartículas metálicas en aguas residuales como desechos después de su proceso de síntesis o como residuos de otros productos formados con base en estas nanopartículas. En un principio, pueden aparecer disueltas en cuerpos de agua, pero con el tiempo comienzan a ser precipitadas y tienden a aglomerarse si no están estabilizadas o recubiertas de algo adicional, formando un material sólido. Aunque las partículas más grandes se difunden de forma más lenta al suelo o subsuelo, tienden a sedimentarse, logrando unirse más fácil al fondo por su carga positiva; así mismo, pueden actuar como absorbentes de otras sustancias que pueden cambiar el pH del agua, comprometiendo el desarrollo de los organismos de este ambiente.

Se puede concluir que la problemática principal con los nanomateriales es la falta de investigaciones exhaustivas sobre sus posibles efectos negativos. También se puede afirmar que si la dimensión del nanomaterial es menor, mayor será el efecto adverso, debido a que pueden penetrar con mayor facilidad distintos ambientes, hasta los no deseados.

9. Referencias

- Adewale Adewuyi, Woei Jye Lau, (2021), Nanomaterial development and its applications for emerging pollutant removal in water, In *Micro and Nano Technologies*, Elsevier, 67-97, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821506-7.00003-X>
- Amaya J., Quiroga W. (2019). Nanomateriales: una clasificación desde sus dimensiones. *Revista química e industria*. 7.
- Alcalá-Alcalá, Sergio, and Quintanar-Guerrero, David. (2014). La terapia a nanoescala: ensamblaje de estructuras liberadoras de fármacos. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 7(12), p.32-48.
- Anbusagar N.R.R., Palanikumar K, Ponshanmugakumar A. (2018). Preparation and properties of nanopolymer advanced composites: a review. *Polymer-based nanocomposites for Energy and Environmental Applications*. 27-73.
- Borja-Borja J., Rojas-Oviedo B., (2020). Nanomateriales: métodos de síntesis. *Pol. Con.* (Edición núm. 48) 5 (08) p. 426-445.
- Castro Ramos J, Villanueva A., Ortiz Lima C., (2013). Espectroscopia raman y sus aplicaciones. *Óptica pura y aplicada*, <http://dx.doi.org/10.7149/OPA.46.1.83>.
- Comision Europea, recomendaciones de la comisión de 18 de octubre de 2011 relativa a la definición de nanomaterial (2011/696/UE) <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:275:0038:0040:ES:PDF>
- Drexler, K. E. (1986). *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. Anchor Books.
- Durán Alvarez J., Avella E., Zanella R. (2021). Descontaminación de agua utilizando nanomateriales y procesos fotocatalíticos. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 8 (14).
- Duque Sánchez L., Rodriguez L., López M. (2013). Electrospinning: la era de las nanofibras, *Revista Iberoamericana de polímeros* 14 (1).
- Faraday Michael (1857). Experimental relations of gold (and other metals) to light, *The bakerian Lecture*. <https://doi.org/10.1098/rstl.1857.0011>
- Haleem A., Javaid M., Pratap R., (2023). Shanay Rab, Rajiv Suman, Applications of nanotechnology in medical field: a brief review, *Global Health Journal*, 7 (2) p. 70-77, <https://doi.org/10.1016/j.glohj.2023.02.008>
- Ibrahim M. El-Sherbiny, Kholoud Arafa, Mostafa Fytory (2021), Physical properties, classification, synthesis, and functionalization of magnetic nanomaterials, in *Magnetic Nanomaterials in Analytical Chemistry*, Editorial Elsevier, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822131-0.00015-7>
- B.J. Inkson, Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization, *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, Woodhead Publishing, 2016, p. 7-43, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00002-X>.

- Jaramillo-Raquejo D., Palacio-Espinosa C., y Ageorges H., “Estudio de los parámetros de proyección térmica por plasma de blancos de TiO₂ usados en magnetron sputtering”, *TecnoLógicas*, 23 (47) p. 137.
- Khaled Parvez (2019), *Characterization Techniques of Two-Dimensional Nanomaterials, Micro and Nano Technologies*, Ed. Elsevier, 27-41, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815889-0.00002-7>
- Klinkova A., Héloïse Thérien-Aubin, (2024), *Characterization techniques, Nanochemistry*, Ed. Elsevier, 9-47, <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21447-9.00008-4>
- Moreno B., (2009), Una revisión del uso del TiO₂ en terapias e ingeniería tisular, *Cerámica y vidrio*, 48 (6), p321-328.
- Namra Abid, Aqib Muhammad Khan, Sara Shujait, Kainat Chaudhary, Muhammad Ikram, Muhammad Imran, Junaaid Haider, Maaz Khan, Qasim Khan, Muhammad Maqbool, (2022) Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: A review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 300, 102597, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102597>
- Nunes D., Pimentel A., Santos L., Barquinha P., Pereira L., Fortunato E., Martis R. (2019). Metal Oxides Nanoestructures synthesis, Properties, and applications. *Metal oxides* 1-19. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811512-1.00001-1>
- Nevárez Martínez M., Espinoza Montero P., Quiroz Chávez F., Ohtani B., (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO₂. *Avances en Química*. 12(2-3), 45-59.
- Parada J, Rodríguez R., Lujano J, (2016), Síntesis de zeolita tipo A amónica para la absorción de dióxido de carbono, *Anales de la Universidad Metropolitana*, 16 (1), p 203-227.
- P. Senthil Kumar, K. Grace Pavithra, Mu. Naushad, (2019), *Characterization techniques for nanomaterials, Nanomaterials for Solar Cell Applications*, Elsevier, 97-124, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813337-8.00004-7>
- K. Ratnesh, A. Goel, G. Kaushik, H. Garg, Chandan, M. Singh, B. Prasad, (2021) Advancement and challenges in MOSFET scaling, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 134, 106002, <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106002>
- Sim, S., Kuu Wong N., (2021). Nanotechnology and its use in imaging and drug delivery (Review). *Biomedical Reports*, 14, 42. <https://doi.org/10.3892/br.2021.1418>
- Sebastián V. (2018). Nanocristales, nuevos materiales con propiedades y aplicaciones únicas. *Fundamentos Conceptuales y Didácticos*. p 306-314.
- Tawfik A. (2020) Nanomaterials: Classification, properties, and environmental toxicities, *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101067, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101067>
- Velandia J. (2017). Identificación de polímeros por espectroscopia infrarroja, *Revista ONTARE*, 5, p115-140.

CAPÍTULO 3

SENSORES DE GAS PARA LA DETECCIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

O. Goiz¹, G. F. Pérez-Sánchez²

1. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, C.P. 07340, México.

2. Centro de Investigación en Fisicoquímica de Materiales, ICUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Eco Campus Valsequillo VAL-3, San Pedro Zacachimalpa, Pue., C.P. 72960, México.

1. Introducción

La detección de contaminantes atmosféricos es vital para proteger la salud humana y el medio ambiente. Según la Organización Mundial de la Salud, la contaminación del aire es una preocupación mundial, ya que casi toda la población respira un aire que excede los límites permitidos de contaminantes; también estima que la mala calidad del aire causó la muerte prematura de 7 millones de personas en 2016. En este contexto, los sensores de gas desempeñan un papel fundamental para medir y analizar la concentración de contaminantes, pues se puede obtener información para actualizar las políticas de control o mitigación. En este capítulo se expone brevemente la importancia del monitoreo de contaminantes atmosféricos, se abordan los diversos tipos de sensores de gases y se exploran los progresos y desafíos asociados con la tecnología de estos en el contexto del monitoreo ambiental. En la parte final del capítulo se habla de la nariz electrónica, un sistema que ha representado un gran reto para las y los investigadores que trabajan en estos temas.

2. Importancia de la detección de contaminantes atmosféricos

La Organización Mundial de la Salud (2023) define que la contaminación del aire ocurre cuando se encuentran presentes agentes contaminantes químicos, físicos o biológicos que alteran las características naturales de la atmósfera. En este sentido, también menciona que casi toda la población mundial respira un aire que supera los límites de contaminantes permitidos. Como se mencionó en el capítulo 1, algunos de estos agentes contaminantes son:

- Dióxido de azufre (SO_2): Se produce principalmente por la quema de combustibles fósiles que contienen azufre, como el carbón y el petróleo. También es uno de los gases comúnmente liberados durante erupciones volcánicas (International Volcanic Health Hazard Network, 2023).
- Dióxido de nitrógeno (NO_2): Se forma por el uso de combustibles fósiles en los motores de los vehículos y las instalaciones industriales. Este gas está estrechamente relacionado con el asma y otras afecciones respiratorias (World Health Organization, 2023).
- Monóxido de carbono (CO): Se libera principalmente por la quema de combustibles carbonosos como madera, gas natural, gasolina y carbón. Puede ser especialmente peligroso en espacios cerrados (World Health Organization, 2023).
- Compuestos orgánicos volátiles (COV): Son liberados por actividades industriales, productos químicos, disolventes, pinturas, combustibles y otros procesos que involucran compuestos orgánicos. Pueden tener efectos adversos para la salud y su concentración suele ser más alta en espacios interiores que en exteriores (Environmental Protection Agency, 2022).
- Partículas suspendidas: Son pequeñas partículas sólidas o líquidas en el aire, como el polvo, el hollín y el polen. Las erupciones volcánicas y los incendios forestales pueden incrementar el número de partículas suspendidas en el aire (International Volcanic Health Hazard Network, 2023).
- Vientos y corrientes de aire: Los patrones de viento y las corrientes de aire pueden transportar contaminantes a largas distancias y afectar la dispersión de estos. La ceniza del volcán, por ejemplo, puede viajar cientos de kilómetros (González-Mellado *et al.*, 2010).
- Contaminantes biológicos: Bacterias, virus, caspa de animales, saliva de gatos, polvo doméstico, ácaros de polvo, cucarachas y polen. Algunos contaminantes biológicos desencadenan reacciones alérgicas, entre ellas neumonitis por hipersensibilidad. Se ha demostrado que el polen derivado de las plantas es la principal causa de alergias respiratorias, como el asma y la rinitis alérgica (Environmental Protection Agency, 2022; Sedghy *et al.*, 2018).

En este sentido, para proteger la salud pública, preservar los ecosistemas y combatir el cambio climático, es esencial el monitoreo de contaminantes en el ambiente. Mediante el monitoreo adecuado y la implementación de medidas correctivas, es posible identificar áreas con altos niveles de contaminación y determinar sus fuentes correspondientes, lo que permite evaluar la eficacia de las políticas adoptadas. Desde que se realizan mediciones de contaminantes atmosféricos, se comprende mejor las tendencias y los patrones estacionales, facilitando la planificación y la toma de decisiones que promueven espacios más limpios, saludables y sostenibles para las generaciones presentes y futuras.

Gracias a los avances en la tecnología de sensores de gas y material particulado, ahora es posible realizar monitoreo en tiempo real y de manera más precisa. Estos sensores pueden detectar una amplia gama de gases contaminantes, con alta sensibilidad y selectividad. Algunos dispositivos incluso son portátiles y de bajo costo, lo que permite un monitoreo más accesible y descentralizado (Rambo, 2022). El monitoreo de contaminantes no solo es importante a nivel local, sino también a nivel global.

La Organización Mundial de la Salud estima que las enfermedades atribuibles a la contaminación del aire están a la par con otros riesgos relevantes para la salud mundial, como las dietas poco saludables y el consumo de tabaco. En 2015, esta misma organización reconoció a la contaminación del aire como un factor de riesgo para enfermedades no transmisibles, como cardiopatía isquémica, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, asma y cáncer (World Health Organization, 2021).

Figura 3.1. Contaminación en la ciudad de Puebla



Fuente: Tomado de Cinco Radio (2023)

Además de los agentes contaminantes en espacios abiertos, algunos gases como el radón, los compuestos orgánicos volátiles (COV), el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂) pueden acumularse en espacios cerrados y representar un riesgo para la salud de sus ocupantes (Minnesota Department of Health, 2022). Para evitar esto, se deben atender los problemas de ventilación, fugas de gas o reparación de equipos, manteniendo así un ambiente interior saludable y seguro. Actualmente, existen en el mercado una gran variedad de dispositivos que pueden instalarse fácilmente en espacios cerrados (OBEO, 2022).

3. Estaciones de monitoreo atmosférico

Ampliando lo que se mencionó en el capítulo 1, los parámetros de medición de los contaminantes están basados en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), por ejemplo (SMADSOT, 2023):

- NOM-025-SSA1-2014.: Su objetivo es establecer los límites de concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire y los criterios para su evaluación, y de esa forma proteger la salud de la población.
- NOM-043-SEMARNAT-1993: Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.
- NOM-081-SEMARNAT-1994: Establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido que genera el funcionamiento de las fuentes fijas y el método de medición por el cual se determina su nivel emitido hacia el ambiente.
- NOM-085-SEMARNAT-2011: Establece los niveles máximos permisibles de emisión de humo, partículas, monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NOx) de los equipos de combustión de calentamiento indirecto que utilizan combustibles convencionales o sus mezclas, con el fin de proteger la calidad del aire.

A los contaminantes que se les ha establecido un límite máximo permisible se les conoce como contaminantes criterio y tienen la característica de estar presentes en casi todo el mundo (Environmental Protection Agency, 2022). Estos son:

- Ozono (O₃): Es un contaminante que puede causar problemas respiratorios, irritación de los ojos y afectar la función pulmonar.
- Dióxido de azufre (SO₂): Es un contaminante que puede contribuir a la formación de lluvia ácida y causar problemas respiratorios, especialmente en personas con enfermedades pulmonares preexistentes.
- Monóxido de carbono (CO): Puede ser peligroso en espacios cerrados, ya que se une a la hemoglobina en la sangre y reduce su capacidad de transportar oxígeno, lo que puede provocar envenenamiento y daño a los tejidos.

- Dióxido de nitrógeno (NO_2): Es un contaminante que contribuye a la formación de esmog y puede causar problemas respiratorios, principalmente en infantes asmáticos, inflamación pulmonar y afectar la función pulmonar a largo plazo.
- Partículas suspendidas (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$): Las partículas suspendidas son pequeñas partículas sólidas o líquidas en el aire que pueden provenir de diversas fuentes, como la quema de combustibles fósiles, la industria y el polvo en suspensión. Estas partículas pueden ser inhaladas y causar problemas respiratorios, irritación en los ojos y contribuir a enfermedades cardiovasculares y respiratorias.
- Plomo (Pb): Se acumula en huesos, sangre y tejido suave del cuerpo humano. La exposición a este contaminante puede tener efectos dañinos en el sistema nervioso, especialmente en los infantes, y puede causar problemas de desarrollo, daño renal y afectar la función cognitiva.

La exposición prolongada o en concentraciones elevadas a estos contaminantes puede causar efectos adversos en el sistema respiratorio, el sistema cardiovascular y el sistema nervioso. Por esta razón, para asegurar el cumplimiento de los estándares ambientales, identificar tendencias y proporcionar alertas en caso de emergencias ambientales, constantemente se mide la calidad del aire utilizando estaciones de monitoreo atmosférico.

En Puebla, la entidad encargada del monitoreo ambiental es la Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial (SMADSOT) a través de la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA). La REMA es un sistema que permite realizar el diagnóstico permanente de la calidad del aire. Cuenta con cinco estaciones de monitoreo atmosférico, cada una con un radio de acción de 3 km. Mediante la REMA se recopilan datos precisos y actualizados sobre la calidad del aire y otros parámetros atmosféricos, proporcionando información crucial para la toma de decisiones en la gestión ambiental y el cuidado de la salud pública (SMADSOT, 2023).

Una estación de monitoreo atmosférico tiene componentes y equipos que permiten medir y registrar la calidad del aire (Figura 3.2). Algunos de los elementos comunes que se encuentran dentro de una estación de monitoreo atmosférico son:

- Analizadores de partículas: Miden la concentración y el tamaño de las partículas suspendidas en el aire, también conocidas como material particulado. Pueden medir tanto partículas finas ($2.5 \mu\text{m}$) como partículas más grandes ($10 \mu\text{m}$). Estos analizadores utilizan tecnologías como la dispersión de luz láser y la espectroscopia para determinar las características de las partículas en el aire.
- Sensores meteorológicos: Registran las condiciones meteorológicas: temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica y radiación solar. Estos datos son importantes para comprender la dispersión de contaminantes y analizar las condiciones atmosféricas que pueden afectar la calidad del aire.

- Analizadores de gases: Miden la concentración de gases contaminantes en el aire, como dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), ozono (O_3) y algunos COV. Los analizadores utilizan diferentes técnicas, como la espectrofotometría, la cromatografía y la quimioluminiscencia, para realizar estas mediciones.
- Sistema de adquisición y almacenamiento de datos: Es un sistema informático que registra y almacena los datos recolectados por los analizadores y sensores. Permite el procesamiento y análisis de los datos para generar informes y evaluaciones de la calidad del aire.

Figura 3.2. Estación de monitoreo atmosférico en la ciudad de Puebla



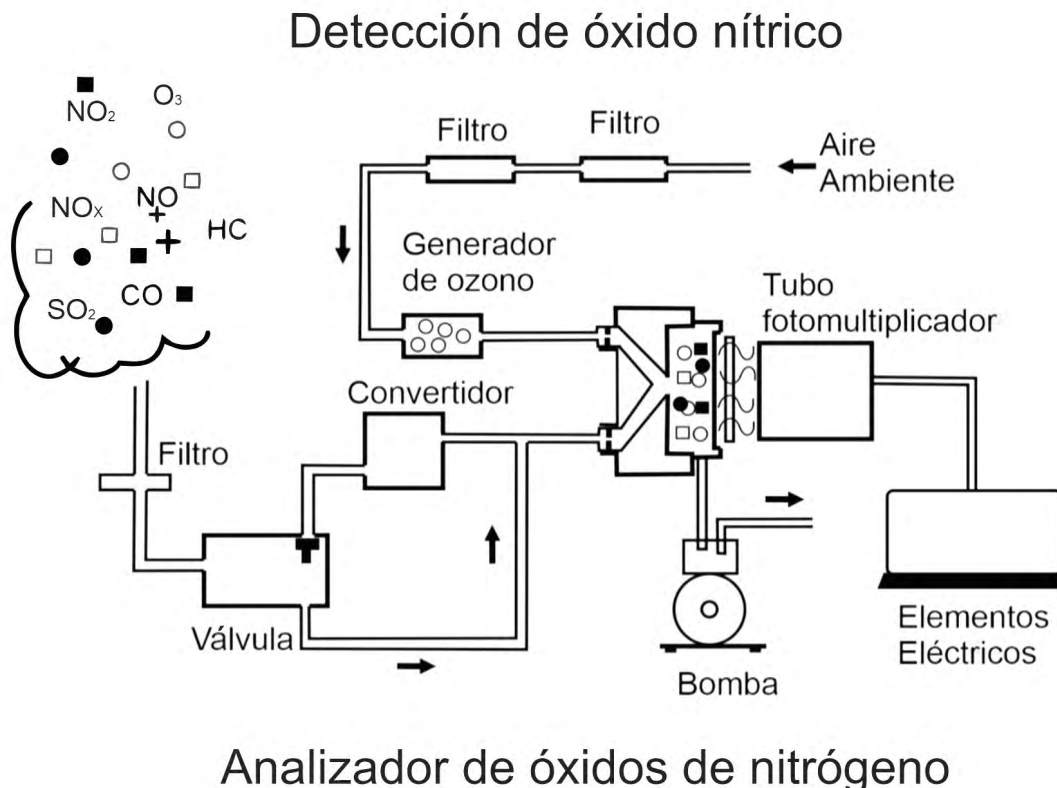
Fuente: Tomado de Portal Ambiental (2020)

Por ejemplo, la REMA emplea la técnica de quimioluminiscencia (producción de luz a partir de una reacción química) para la detección del dióxido de nitrógeno. En esta técnica se hace reaccionar óxido nítrico (NO) y ozono (O_3) para formar un intermediario con alta energía. Cuando este intermediario regresa a su estado basal, libera energía en forma de fotones de luz. La intensidad de la luz emitida está directamente relacionada con la concentración del contaminante (NO_2) en la muestra de aire. El diagrama de este tipo de analizadores se puede ver en la Figura 3.3.

Los sensores de gas de quimioluminiscencia ofrecen una alta sensibilidad y selectividad, así como una respuesta rápida, pero presentan algunas desventajas frente a otro tipo de sensores: mayor costo, tamaño y complejidad en su operación y mantenimiento. Si bien los sensores de gas basados en la técnica de quimioluminiscencia son ampliamente utilizados para el sensado de gases en las estaciones de monitoreo

atmosférico, no son los únicos disponibles en el mercado. Otros tipos de sensores como los electroquímicos y los semiconductores también se emplean para detectar y medir la presencia de gases en el ambiente.

Figura 3.3. Analizador de óxidos de nitrógeno



Fuente: Tomado de SMADSOT (2023)

4. Tipos de sensores de gas

Existen muchos tipos de sensores de gas; para elegir el más adecuado, es necesario conocer y comprender sus características. Algunos son mejores para medir gases tóxicos, mientras que otros ofrecen mayor precisión o portabilidad.

- **Sensores electroquímicos:** Aprovechan las reacciones electroquímicas que ocurren entre los gases y los electrodos. El gas por detectar se disuelve en un electrolito y los electrodos generan una corriente eléctrica proporcional a la concentración del gas. La corriente medida es utilizada para determinar la presencia y la cantidad del gas. Los sensores electroquímicos son ampliamente utilizados para la detección de gases tóxicos como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de azufre (SO₂) (Renke, 2022).

- Sensores semiconductores: Miden el cambio de resistencia eléctrica de un material semiconductor cuando este se expone a un gas específico. Esta variación es medida y utilizada para determinar la concentración del gas. Actualmente, este tipo de sensores es uno de los más empleados, ya que pueden detectar tanto gases orgánicos como inorgánicos (Isaac, *et al.*, 2022).
- Sensores infrarrojos: Se basan en la absorción de luz infrarroja por parte de los gases. Cada gas tiene una firma espectral única que permite identificarlo y cuantificarlo. El sensor emite una luz infrarroja específica y se mide la cantidad de luz absorbida por el gas en cuestión, lo que permite determinar su concentración. Los sensores de gas infrarrojos son usados para la detección de gases como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y los hidrocarburos (Renke, 2022).
- Sensores catalíticos: Estos sensores elevan la temperatura de los gases combustibles utilizando un calentador de platino. A temperatura de combustión, los gases combustibles experimentan oxidación y liberan una gran cantidad de calor. Su funcionamiento se basa en el principio de convertir el aumento de temperatura en una señal de sensor a través de un circuito estándar tipo puente de Wheatstone. La señal del sensor es directamente proporcional a la cantidad de gas introducido en la cámara (Renke, 2022).
- Otros sensores: Además de los antes mencionados, existen otros tipos de sensores utilizados para la detección de gases. Los sensores de gas magnéticos emplean este principio para medir la presencia y concentración de ciertos gases. Los sensores de gas de fotoionización ocupan la ionización de gases por radiación ultravioleta para detectar compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros gases. Los sensores de conductividad térmica se basan en la diferencia de conductividad térmica entre el gas en estudio y un gas de referencia para medir su concentración. Algunos son más sofisticados, como los analizadores de cromatografía de gases con los que se puede identificar y cuantificar diferentes componentes gaseosos. Estos sensores y analizadores ofrecen opciones adicionales para adaptarse a las necesidades específicas de detección de gases en diversas aplicaciones (Renke, 2022; Rout, 2021; Nadargi *et al.*, 2023; Asahi KASEI, 2023).

5. Desafíos y avances en la tecnología de los sensores de gas

La tecnología de sensores de gas enfrenta varios desafíos que han impulsado la investigación y el desarrollo de nuevas soluciones. Algunos de estos desafíos incluyen:

- **Selectividad:** Los sensores de gas deben distinguir entre diferentes gases y detectar selectivamente el de interés. La selectividad es un desafío debido a que algunos gases pueden ser similares en sus propiedades físicas y químicas, lo que dificulta la detección precisa.
- **Sensibilidad y rango de detección:** Los sensores deben ser lo suficientemente sensibles para detectar bajas concentraciones de gas y tener un amplio rango de detección.
- **Interferencias y condiciones adversas:** Los sensores pueden verse afectados por interferencias de otros gases, humedad, temperatura y condiciones ambientales desfavorables. Estos factores pueden alterar la precisión y confiabilidad de las mediciones, lo que representa un desafío para garantizar resultados precisos y consistentes.

Actualmente, la investigación y los avances tecnológicos han permitido superar muchas de las limitaciones de los sensores de gas tradicionales. Algunos avances son:

- **Sensores selectivos:** Se han desarrollado sensores con alta selectividad mediante el uso de materiales específicos y técnicas de diseño avanzadas. Esto permite la detección precisa de determinados gases y minimiza las interferencias de otros compuestos.
- **Nanotecnología:** La nanotecnología ha revolucionado la tecnología de sensores de gas al permitir la fabricación de sensores no necesariamente más pequeños, sino con mejores características sensitivas. Los nanomateriales tienen propiedades únicas que mejoran la sensibilidad y selectividad de los sensores, lo que lleva a una detección más precisa y rápida.
- **Sensores inteligentes:** Los avances en la electrónica y la computación han permitido la integración de sensores de gas con sistemas inteligentes. Estos sensores pueden analizar y procesar datos en tiempo real, lo que brinda una mayor capacidad de análisis y una respuesta más rápida frente a cambios en el entorno.

I. Nariz electrónica

El monitoreo de la calidad del aire en entornos urbanos es una práctica fundamental para evaluar y controlar la presencia de contaminantes atmosféricos, lo que permite comprender su impacto en la salud pública y el medio ambiente. Una parte crucial de este monitoreo se centra en la detección de gases tóxicos y gases de efecto invernadero. Como se ha mencionado en este libro, la detección de gases tóxicos implica la identificación y medición de sustancias dañinas para la salud, como el dióxido de azufre (SO₂), el dióxido de nitrógeno (NO₂), el monóxido de carbono (CO), entre otros. Además de detectar estos elementos, debe ser portable, económico, requerir poco mantenimiento y fácil de operar. Al dispositivo que cubre estos requerimientos se le llama comúnmente nariz electrónica.

Una nariz electrónica es realmente un sistema basado en una matriz de sensores que imita el sistema olfativo humano, por lo que puede detectar e identificar una gran cantidad de tipos de gases en el aire. Para el monitoreo atmosférico, además de los gases criterio, una nariz electrónica puede detectar fugas de productos químicos peligrosos e identificar la fuente de la contaminación, incluso por olores. Otras aplicaciones podrían estar en el ámbito médico, para diagnosticar algunas enfermedades, o en el alimentario, para detectar el deterioro de los alimentos y garantizar su calidad y seguridad para el consumidor.

En 2020, un equipo de investigadores de España fabricó un sistema de este tipo compuesto por cuatro sensores de estado sólido incorporados a un microcontrolador con el objetivo de detectar contaminantes atmosféricos. Las características principales de este dispositivo fueron: portabilidad, conectividad, procesamiento de datos, clasificación de datos, desempeño y tiempo de respuesta. Con este sistema de sensores lograron detectar NO₂ y recibir la información directamente en un teléfono inteligente (Arroyo *et al.*, 2020).

Otra aplicación reportada para la nariz electrónica es el monitoreo de la calidad del aire en interiores. En estos espacios tiene un alto potencial de uso gracias a su tamaño, versatilidad y fácil operación. Por ejemplo, con un sistema de este tipo se ha reportado la detección de COV como metano, etano y tolueno. Los resultados también se reciben directamente en un teléfono inteligente (He *et al.*, 2017).

Si bien son muchas las aplicaciones que se le han dado a la nariz electrónica, todavía presentan algunas limitaciones, como la capacidad para discriminar los gases y ofrecer resultados precisos. No obstante, como se mencionó anteriormente, se espera que desempeñen un papel importante en el monitoreo ambiental y en otras áreas como la seguridad alimentaria y el diagnóstico médico.

En una nariz electrónica (Figura 3.4), el arreglo de sensores normalmente está hecho a base de sensores de gas de estado sólido, debido a que son sensibles a una amplia gama de COV, así como de otros gases tóxicos, aunque también se usan sensores electroquímicos y sensores infrarrojos (Khorramifar *et al.*, 2023; Kumar *et al.*, 2023).

Figura 3.4. Nariz electrónica para monitoreo atmosférico



Fuente: Tomado de Ruian environment (2023)

II. Sensores de gas de estado sólido

Un sensor de estado sólido es un dispositivo utilizado para detectar y medir ciertos gases o vapores en un entorno determinado. A diferencia de los sensores convencionales que utilizan componentes líquidos o gaseosos, los sensores de estado sólido emplean materiales sólidos como componente sensitivo; los más comunes son los óxidos metálicos semiconductores.

Estos sensores funcionan mediante el principio de cambio en las propiedades eléctricas de los materiales sólidos cuando son expuestos a los gases objetivo. Cuando el gas interactúa con el material sensitivo, también llamado capa activa, se produce una reacción en la superficie del sólido que provoca una alteración en su conductividad eléctrica.

La clave del funcionamiento de un sensor de estado sólido radica en la selectividad y sensibilidad del material utilizado. Los óxidos metálicos semiconductores, como el

óxido de estaño, óxido de zinc, óxido de titanio o el óxido de tungsteno, son efectivos por la gran variedad de gases detectados. Estos materiales pueden ser modificados y ajustados para que respondan de manera específica a determinados gases, lo que permite su uso en muchas aplicaciones; el monitoreo ambiental y la seguridad industrial son algunos ejemplos.

Los sensores de gas basados en óxidos metálicos ofrecen respuesta rápida, alta sensibilidad, bajo consumo de energía y una larga vida útil. Además, al ser dispositivos sólidos, son más robustos y menos susceptibles a interferencias externas que los sensores líquidos o gaseosos. En la detección de gases contaminantes, tienen alta sensibilidad, respuesta rápida, precisión, selectividad, estabilidad y reversibilidad. Actualmente, la tecnología de los sensores de gas de estado sólido se basa principalmente en los nanomateriales, debido a que estos tienen propiedades únicas, como una mayor área superficial y morfologías diversas que mejoran la sensibilidad. Para ello, primeramente deben controlarse las características de los nanomateriales de la capa activa: morfología, tamaño de grano, porosidad y dopaje de los materiales, ya que afectan la sensibilidad y selectividad de los sensores basados en nanomateriales.

Hasta ahora, los avances en la tecnología de sensores de gas de estado sólido permiten la fabricación de dispositivos muy pequeños, de apenas algunos milímetros de diámetro, así como una larga vida útil. Además, estos sensores se pueden aplicar en una amplia variedad de entornos: seguridad doméstica, tecnologías automotrices, ahorro de energía, monitoreo ambiental, salud, entre otros.

Figura 3.5. Sensor de estado sólido para detectar metano



Fuente: Tomado de Figaro Inc. (2023)

6. Conclusiones

Los contaminantes atmosféricos provocan serios daños no solo a la salud humana, sino también a la salud animal y ambiental. El mejoramiento de la calidad del aire requiere de diferentes acciones e iniciativas. En este capítulo fueron explicadas algunas tecnologías innovadoras que buscan contribuir en el monitoreo de contaminantes atmosféricos.

Promoviendo las tecnologías económicas y de fácil operación, se busca incrementar la participación en temas ambientales. Se espera que, en un futuro cercano, tanto la tecnología de los sensores de gas como las buenas prácticas y políticas ambientales permitan disminuir los niveles de contaminación atmosférica y con ello mejorar la calidad de vida de las personas.

7. Referencias

- Arroyo, P., Meléndez, F., Suárez, J. I., Herrero, J. L., Rodríguez, S., y Lozano, J.(2020). Electronic Nose with Digital Gas Sensors Connected via Bluetooth to a Smartphone for Air Quality Measurements. *Sensors*, 20(3), 1-16. <https://doi.org/10.3390/s20030786>
- Asahi KASEI. (2023). *Gas sensors types and mechanism*. <https://www.akm.com/eu/en/>
- Cinco Radio. (2023). *Continúa la mala calidad del aire en Puebla*. <https://cincoradio.com.mx/continua-la-mala-calidad-del-aire-en-puebla/>
- Environmental Protection Agency. (2022). *Volatile Organic Compounds*. <https://www.epa.gov/>
- Figaro Inc. (2023). *Figaro sensors*. <https://www.figarosensor.com/>
- González-Mellado A.O. y De la Cruz-Reyna S. (2010). A simple semi-empirical approach to model thickness of ash-deposits for different eruption scenarios. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2241–2257.
- International Volcanic Health Hazard Network. (2023). *Dióxido de azufre (SO₂)*. <https://www.ivhnn.org/es/guidelines/guia-sobre-gases-volcanicos/dioxido-de-azufre>
- Isaac, N. P., Pikaar I. y Biskos G. (2022). Metal oxide semiconducting nanomaterials for air quality gas sensors: operating principles, performance, and synthesis techniques. *Microchim Acta*, 189(196). <https://doi.org/10.1007/s00604-022-05254-0>.
- J. He, Liyuan X., Wang P. y Wang Q.(2017). A high precise E-nose for daily indoor air quality monitoring in living environment. *Integration*, 58, 286-294. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2016.12.010>

- Khorramifar, A.; Karami, H.; Lvova, L.; Kolouri, A.; Łazuka, E.; Piłat-Rożek, M.; Łagód, G.; Ramos, J.; Lozano, J.; Kaveh, M.; et al. (2023). Environmental Engineering Applications of Electronic Nose Systems Based on MOX Gas Sensors. *Sensors*, 23(12), 5716. <https://doi.org/10.3390/s23125716>
- Kumar, K. C. ; Chaudhri, S.N.; Rajput, N.S.; Shvetsov, A.V.; Sahal, R.; Alsamhi, S.H. (2023). An IoT-Enabled E-Nose for Remote Detection and Monitoring of Airborne Pollution Hazards Using LoRa Network Protocol. *Sensors*, 23(10), 4885. <http://dx.doi.org/10.3390/s23104885>
- Minnesota Department of Health. (2022). *Carbon Monoxide (CO) Poisoning in Your Home*. <https://www.health.state.mn.us/communities/environment/air/toxins/index.html>
- Nadargi, D. U., Umar A., Nadargi J., Loakare Smita, Akbar S. Imtiaz S., Suryavanshi S. Bhandari L. y Chaskar M. (2023). Gas sensors and factors influencing sensing mechanism with a special focus on MOS sensors. *J Mater Sci*, 58, 559–582.: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-022-08072-0>
- OBEO. (2022). *Indoor Air Quality*. <https://www.obeo.no/en/tjenester>
- Portal Ambiental. (2020). *Diagnóstico de la calidad del aire de Puebla*. <https://www.porta-lambiental.com.mx/monitoreo-atmosferico/>.
- Rambo, S. (2022). *Why Gas Sensing Is Becoming Localized*. <https://semiengineering.com/how-accurate-are-new-gas-sensors/>
- Renke. (2022). *Gas Sensors Types, Working Principles And Application*. <https://www.renkeer.com/>
- Rout, P. V. y Chandra S. R. (2021). Magnetic gas sensing: working principles and recent developments. *Nanoscale Advances*, 3, 1151-1568. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/na/d0na00826e>
- Ruian environment. (2023). *Air quality stench on-line monitoring system*. <https://www.szrahj.com/en/shows/116/25.html>
- Sedghy F, Varasteh AR, Sankian M, Moghadam M. F, V. A. (2018). Interaction Between Air Pollutants and Pollen Grains: The Role on the Rising Trend in Allergy. *Rep Biochem Mol Biol.*, 219-224.
- SMADSOT. (2023). *Calidad del Aire*. <https://calidaddelaire.puebla.gob.mx/views/principal.php>
- World Health Organization. (2021). *Global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>
- World Health Organization. (2023). *Contaminación atmosférica*. <https://www.who.int/es/>

CAPÍTULO 4

NANOMATERIALES PARA LA CAPTURA DE GASES CONTAMINANTES

K. Quiroz-Estrada¹, Diana Guerrero-Araque², M.E. Velásquez-Torres³

1. Universidad Autónoma Metropolitana–Iztapalapa (UAM-I), Departamento de Química, Fisicoquímica de Superficies, Ciudad de México, C.P. 09340, México.

2. CONAHCYT-Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Química, Av. San Rafael Atlixco 156, C.P. 09340, Ciudad de México, México.

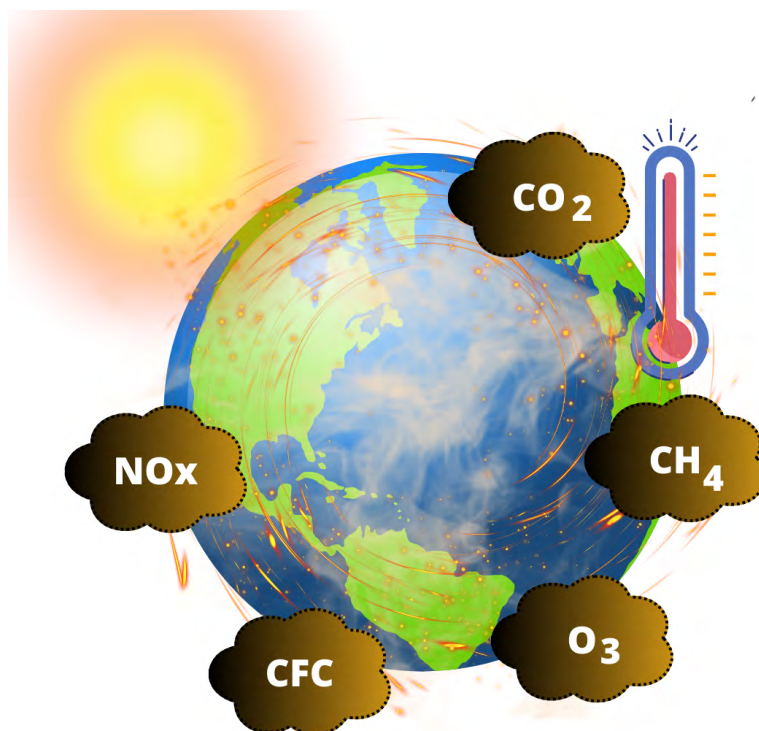
3. Universidad Autónoma Metropolitana–Iztapalapa (UAM-I), Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Posgrado en Energía y Medio Ambiente, Ciudad de México, C.P. 09340, México.

1. Introducción

El crecimiento acelerado antropogénico ha generado que se atravesase por una crisis climática, debida principalmente a la emisión indiscriminada de gases contaminantes a la atmósfera, por lo que diversos grupos de investigación han propuesto el desarrollo de nanotecnologías emergentes y nuevos nanomateriales que puedan dar solución a las problemáticas actuales de contaminación atmosférica. En el presente capítulo se explicará el proceso de adsorción y el uso de materiales nanométricos porosos, nanoporosos y jerárquicos, es decir, con distintos tamaños de poro, aplicados a la captura de gases de efecto invernadero, en especial CO_2 .

El desarrollo económico e industrial mundial ha tomado tal fuerza que aproximadamente 41 000 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO_2) son emitidas anualmente, lo que contribuye en gran medida al aumento de la temperatura del planeta. Este gas es el principal del grupo que se conoce como gases de efecto invernadero (GEI), entre los que adicionalmente se encuentra el metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O_3) y clorofluorocarbonos (CFC) (Figura 4.1) (Vaz *et al.*, 2022). En los últimos años, y con la evolución de la nanotecnología, diversos grupos de investigación académicos e industriales se han puesto como objetivo desarrollar nanomateriales que puedan hacer frente a esta problemática, mediante la captura, almacenamiento y conversión de gases de efecto invernadero (Zhang *et al.*, 2022).

Figura 4.1. Principales gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global

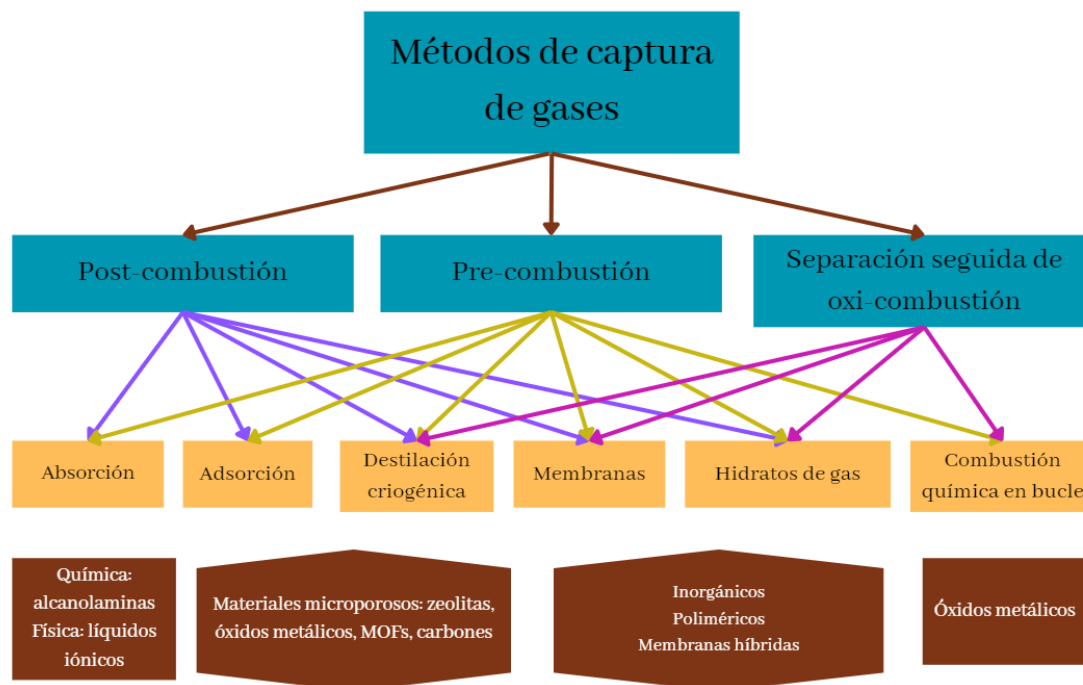


Fuente: Elaboración propia

Complementando lo mencionado en el capítulo 2, el término “nanotecnología” se define como “el entendimiento y el control de la materia en dimensiones, aproximadamente, desde 1 a 100 nanómetros, donde fenómenos únicos permiten aplicaciones nuevas. Comprende la ciencia a nanoescala, ingeniería y tecnología, e incluye la obtención de imágenes, medidas, modelado y manipulación de la materia en dicha escala” (ScienceDirect, 2007). Además, el término “nano” puede ser ocupado de acuerdo con la influencia que la escala tiene sobre propiedades físicas, químicas y ópticas en los materiales. Es decir, la nanotecnología incluye la funcionalidad de una dimensión individual.

Existen diferentes metodologías reportadas para la captura de gases utilizando materiales a diferentes escalas, entre ellas, la nanométrica, las cuales se dividen por la etapa de combustión en la que se capturan los contaminantes. En la Figura 4.2 se observa que los procesos de adsorción son llevados a cabo en la precombustión y poscombustión, y se utilizan en su mayoría materiales microporosos como adsorbentes.

Figura 4.2. Métodos de captura de gases



Fuente: Tomado de Wang *et al.* (2021)

Por lo tanto, el desarrollo científico sigue evolucionando y creando métodos para mejorar el entendimiento y control en la síntesis y modificación de estructuras nanométricas a niveles moleculares y atómicos (1×10^{-9} m) (Domènech, 2010). Entre las posibilidades más prometedoras para trabajar a escala nanométrica, se encuentra el uso de materiales adsorbentes, cuya principal propiedad es la porosidad (Flanigen, 2001). La investigación y el desarrollo de la nanotecnología en años recientes han permitido avances considerables en la ciencia de la adsorción. Dentro de estos, se incluyen: i) la preparación de materiales nanoporosos con estructuras uniformes de poro, ii) la introducción de técnicas de adsorción de alta resolución y de instrumentación comercial confiable, y iii) la aplicación de las teorías de los funcionales de la densidad (DFT por sus siglas en inglés) y de simulación molecular (Thommes *et al.*, 2015).

2. Adsorción y porosidad

La porosidad es una de las propiedades físicas más importantes de los materiales. Se estudia mediante el análisis textural y los fenómenos de superficie que ocurren al interior de los poros de los materiales. Algunos de ellos, como los sólidos inorgánicos porosos, tienen utilidad como catalizadores y medios de adsorción debido a su

superficie específica interna grande, es decir, la presencia de huecos de dimensiones en las escalas atómica, molecular y nanométrica (Zabukovec Logar y Kaučič, 2006).

Thommes et al., 2015 en la última actualización de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC por sus siglas en inglés) definieron la porosidad como: “el radio del volumen total de poro al volumen de la partícula o aglomerado” (p. 1054)

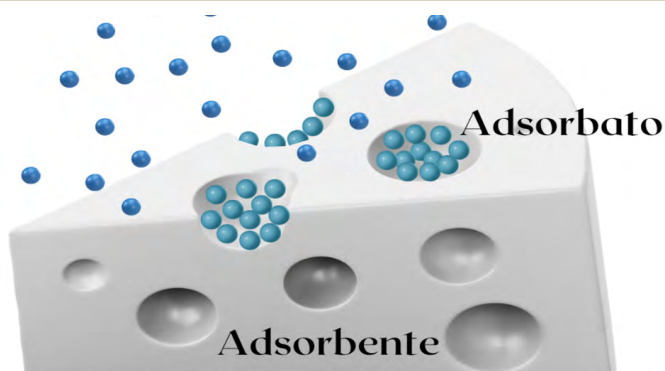
Además, en esta misma, se incluyó el término nanoporo, que abarca las tres categorías ya conocidas con un límite superior de ~100 nm (Thommes et al., 2015). Estas categorías clasifican a los poros de acuerdo con su tamaño/diámetro (w) de poro.

- a) Macroporos: con diámetros (w) por encima de los 50 nm
- b) Mesoporos: si $2 \text{ nm} < w < 50 \text{ nm}$
- c) Microporos: si $w < 2 \text{ nm}$

Cuando se habla de textura de manera coloquial, automáticamente se relaciona con la sensación que se produce con el sentido del tacto al tocar determinada superficie. En cambio, cuando se aborda la textura de una superficie en un sentido estricto fisico-químico de partículas individuales, se define como aquella la geometría que describe el espacio poroso de un material (Gregg y Sing, 1982); esta información se evalúa a través de parámetros obtenidos por metodologías que explican los procesos de adsorción. En 1881, el término adsorción fue introducido por Gregg y Sing, en 1982; en otras palabras, es un proceso mediante el cual las moléculas son atrapadas o retenidas. La adsorción física, también conocida como fisisorción, se utiliza para la caracterización de los materiales y para la evaluación de la capacidad de adsorción de gases contaminantes; se puede definir como el enriquecimiento selectivo de átomos, iones o moléculas en la superficie de un sólido (Kerker y Kratochvil, 1983). En este proceso, las interacciones que se involucran son, en su mayoría, electrostáticas, contrario a la quimisorción, donde surge la aparición de enlaces químicos de acuerdo a qué tan afín sea el adsorbato y el adsorbente (Russel, 1944).

Algunos otros conceptos importantes para entrar en materia son los correspondientes a las partes que intervienen en un proceso de adsorción molecular. En la Figura 4.3 se muestran dichas partes. Si se toma de referencia cualquier material poroso, o sea, cualquier material que tenga dentro de su estructura espacio hueco, ya sean poros aislados o interconectados, un adsorbente se define como la fase sólida con superficies externas e internas (poros) expuestas a las moléculas de un adsorbible. Este último se refiere a las moléculas de gas o líquido que interactúan con los átomos de la superficie sin ser adsorbidas. Finalmente, el adsorbato es el conjunto de moléculas que ya han sido adsorbidas en la superficie del sólido poroso (Keller et al., 2005).

Figura 4.3. Partes principales del fenómeno de adsorción



Fuente: Elaboración propia.

Para la mayoría de los experimentos de adsorción, la temperatura a la que se realizan las mediciones es menor al punto crítico del gas que está siendo adsorbido. Esta capacidad está influida por la temperatura de adsorción a la que se ejecuta el proceso, la presión de vapor y los grupos funcionales, iones o sitios activos del sólido, es decir, la estructura y superficie del adsorbente. La capacidad de adsorción de un gas adsorbido sobre un sólido se expresa como la cantidad de gas adsorbido en gramos, moles o milimoles por gramo de adsorbente, es decir, mmol/g o como volumen de gas capturado reducido o referido a condiciones estándar de temperatura y presión (STP por sus siglas en inglés).

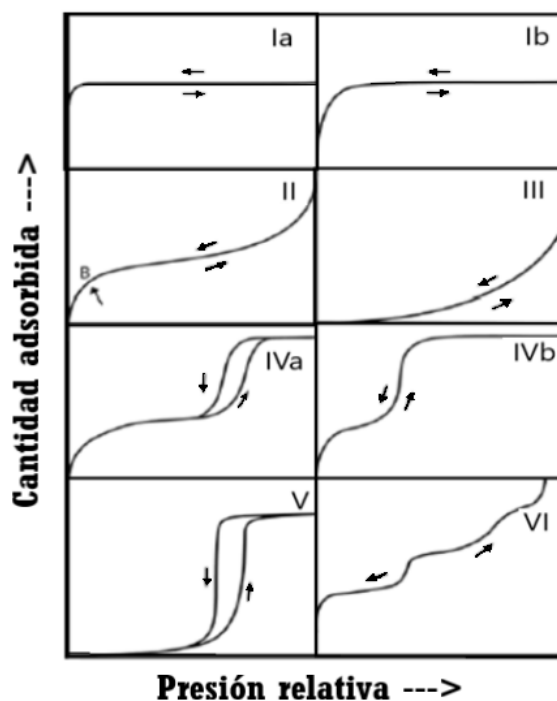
No se puede hablar de un proceso de adsorción y captura de gases sin antes caracterizar los nanomateriales porosos por adsorción de N_2 a 77 K y el estudio de sus isothermas. La forma en la que va evolucionando una isoterma de adsorción en relación con el volumen de N_2 adsorbido permite entender los procesos de llenados de poros y conocer, por medio de cálculos y diversas asunciones y métodos de simulación, características intrínsecas de cada material como su superficie específica, distribuciones de poro, diámetros, volúmenes de meso y microporo, entre otros.

La IUPAC, 1985 propuso la primera clasificación de isothermas donde se podían identificar 6 tipos de acuerdo con la porosidad y propiedades de textura (Sing, K., 1985). En años recientes, se han hecho algunas modificaciones a esta clasificación con la adición de nuevas características y diferencias en los tipos I y IV, así como en los ciclos de histéresis particulares (Thommes *et al.*, 2015). Cada isoterma es la huella dactilar de un material y representa características específicas de los materiales de acuerdo con su porosidad en los desplazamientos de volumen adsorbido a ciertas presiones relativas.

De manera general, las isothermas tipo I se dividen en dos: la primera (Ia) es representativa de materiales con microporos estrechos de tamaño $w < 1$ nm, mientras que la segunda (Ib) incluye microporos mayores a 1 nm y mesoporos angostos de diámetros

de entre 2 y 2.5 nm. La segunda clasificación, isothermas tipo II, representa procesos de fisisorción de gases en materiales macroporosos y no porosos, donde no se observa la restricción en la transición de la etapa de adsorción de la monocapa (punto de inflexión B) con la etapa de formación de la multicapa. De igual forma, las isothermas tipo III representan materiales no porosos o macroporosos, sin embargo, estas son convexas al eje de la presión relativa (p/p_0) y, por lo tanto, no existe el punto de inflexión. Luego, respecto a los materiales mesoporosos, estos son identificados con isothermas tipo IV. Las isothermas tipo IV son características de sólidos mesoporosos, donde hay interacciones adsorbente-adsorbato y entre las moléculas condensadas. La subclasificación IVa se presenta cuando se observa un ciclo de histéresis con mesoporos amplios mayores a 4 nm. Sin embargo, cuando se encuentran mesoporos entre 2 y 4 nm, las isothermas de adsorción y desorción se ajustan indicando su reversibilidad y son clasificadas como IVb. En cuanto a la isoterma tipo V, representa materiales adsorbentes micro y mesoporosos hidrofóbicos, donde el llenado de microporos se retrasa a bajas presiones y el volumen adsorbido comienza a presiones p/p_0 altas. Finalmente, las isothermas tipo VI son escalonadas e inusuales, donde la adsorción se lleva a cabo capa por capa en superficies uniformes no porosas.

Figura 4.4. Clasificación IUPAC de isothermas de adsorción



Fuente: Tomado de Thommes *et al.* (2015).

3. Nanomateriales y materiales nanoporosos adsorbentes de GEI

La estructura molecular de los gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono, óxido nitroso y metano, es capaz de absorber una gran cantidad de calor, provocando el efecto del calentamiento global. Si su concentración de moléculas es alta, la Tierra se sobrecarga de calor, contribuyendo al efecto invernadero (Vaz *et al.*, 2022).

Cuando se habla de procesos de adsorción de gases, se puede decir que esta técnica reduce la cantidad de energía y costos para la captura y separación de CO₂, en especial cuando se aplican en tecnologías de captura postcombustión, por lo que uno de los objetivos es desarrollar materiales y nanomateriales que puedan ser fácilmente recuperados y que tengan una alta duración y selectividad en la captura y separación de gases en efluentes mixtas (Songolzadeh *et al.*, 2012).

En la Tabla 4.1 se puede observar que los materiales de carbono y los aluminio-silicatos son los tipos de materiales con mayor estabilidad térmica y química, además de poseer mayores superficies específicas y microporosidad.

Tabla 4.1. Clasificación de materiales nanoporosos

	Poliméricos	Carbones	Vidrio	Alumino-silicatos	Óxidos	Metales
Tamaño de poro	Meso-Macro	Micro-Meso	Meso-Macro	Micro-Meso	Micro-Meso	Meso-Macro
Superficie específica, As Diámetro de poro (nm)	Baja	Alta	Baja	Alta	Media	Baja
	>0.6	0.3-0.6	0.3-0.6	0.3-0.7	0.3-0.6	0.1-0.7
Estabilidad térmica	Baja	Alta	Regular	Medio-Alta	Medio-Alta	Alta
Estabilidad química	Baja-Media	Alta	Alta	Alta	Muy Alta	Alta
Costo	Alto	Alto	Alto	Bajo-Medio	Medio	Medio
Tiempo de vida	Corto	Largo	Largo	Medio-Largo	Largo	Largo

Fuente: Tomado de Lu y Zhao (2004)

En la literatura se han destacado muchos tipos de materiales nanoporosos cristalinos y amorfos, como los óxidos inorgánicos, arcillas pilareadas, sílices nanoporosas, nanotubos de carbono y las zeolitas, debido básicamente a la porosidad (natural o inducida) que poseen. De manera general, los materiales preferentes para la adsorción de CO₂ son aquellos nanomateriales porosos que poseen grupos superficiales que puedan

interactuar y adsorber una gran cantidad de este gas de la atmósfera o efluentes industriales. Otros nanohíbridos con metales u óxidos metálicos se utilizan para la conversión de CO₂ en subproductos obtenidos por reacciones fotocatalíticas y electrocatalíticas (Zhang *et al.*, 2022).

Los nanomateriales son considerados más eficientes si se encuentran en bulto. Su tamaño en la mayoría de los casos brinda propiedades excepcionales que favorecen la adsorción de moléculas como el CO₂. Las nanopartículas de aproximadamente entre 5 y 50 nm pasan fácilmente a través de las aperturas de poro. Sin embargo, como resultado de la atracción fisicoquímica entre las paredes de los poros y las nanopartículas, la retención de partículas es factible. Las posibilidades de unión de las moléculas a las paredes son altas con el aumento de la velocidad de transporte de partículas que se requiere para empujar las partículas a través de las cavidades de un poro (Mohammed *et al.*, 2020).

En años anteriores se creía que tener una superficie específica alta era sinónimo de una gran capacidad de adsorción. Hoy en día se sabe que, aunque esta medida es un factor clave, además de una superficie y volumen de poro grandes, los nanomateriales pueden ser funcionalizados y/o combinados con otros componentes o grupos funcionales como aminas, nanopartículas de óxidos metálicos, polímeros y/o nanopartículas metálicas, a fin de mejorar las interacciones intermoleculares electrostáticas entre el adsorbato y el adsorbente (Firdaus *et al.*, 2021). Algunos de los nanomateriales más conocidos en la captura y separación de gases por adsorción reportados en la literatura se muestran en la Figura 4.5.

Figura 4.5. Principales materiales porosos adsorbentes de gases de efecto invernadero



Fuente: Elaboración propia

4. Nanomateriales para la captura de CO₂

Para nanomateriales porosos, la adsorción de CO₂ a altas presiones se atribuye principalmente a interacciones adsorbato-adsorbato, en contraste con el caso de la captura selectiva de CO₂, que se atribuye a interacciones adsorbato-adsorbente y, en mayor medida, a la afinidad química del CO₂ a baja presión.

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas triatómico que, en condiciones ambientales, es abundante, no tóxico, reciclable y económico. Además, el CO₂ se sublima de estado sólido a gas a -78 °C bajo presión atmosférica y es comparativamente inerte. Sin embargo, el aumento progresivo de la concentración de CO₂ en la atmósfera es responsable del cambio climático (Vaz *et al.*, 2022), que podría afectar negativamente a los procesos ambientales globales, como temperaturas altas a largo plazo, la variabilidad en los patrones de lluvia, el aumento del nivel del mar, el derretimiento del hielo polar y eventos climáticos severos (Gunawardene *et al.*, 2022). Además de ser el principal gas de efecto invernadero, responsable del calentamiento global, el dióxido de carbono es una molécula de gran interés en la adsorción al poseer propiedades específicas como su diámetro cinético (0.33 nm), polizabilidad (29.1×10^{-25} cm³) y un momento cuadrupolar que exponencializa sus interacciones electrostáticas de 4.3×10^{-26} esu cm² (Bakhtyari *et al.*, 2020).

Los materiales clásicos para la adsorción de CO₂ son las zeolitas por dimensiones de partícula micro y nanométricas, y sus tamaños de poro, que actúan selectivamente en la captura de gases. Exhiben propiedades fisicoquímicas ampliamente variables que incluyen buena estabilidad térmica y capacidad de intercambio iónico. Pueden usarse para la eliminación de CO₂ debido a la presencia de interacciones fuertes dentro de los nanoporos entre el gas, el catión y en algunas ocasiones las moléculas de agua quimisorbida. Las características de las zeolitas son en gran medida una función de la relación Si/Al (Bakhtyari *et al.*, 2020). Al ser aluminosilicatos cristalinos, la presencia de aluminio deja una carga negativa que permite la aparición de sitios catiónicos, donde se pueden intercambiar diferentes cationes como Li⁺, K⁺, Rb⁺, Cs⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, Ca⁺⁺, Zn⁺⁺, entre otros, y que a su vez incrementan las interacciones con el cuadrupolo del CO₂ (Kumar *et al.*, 2020).

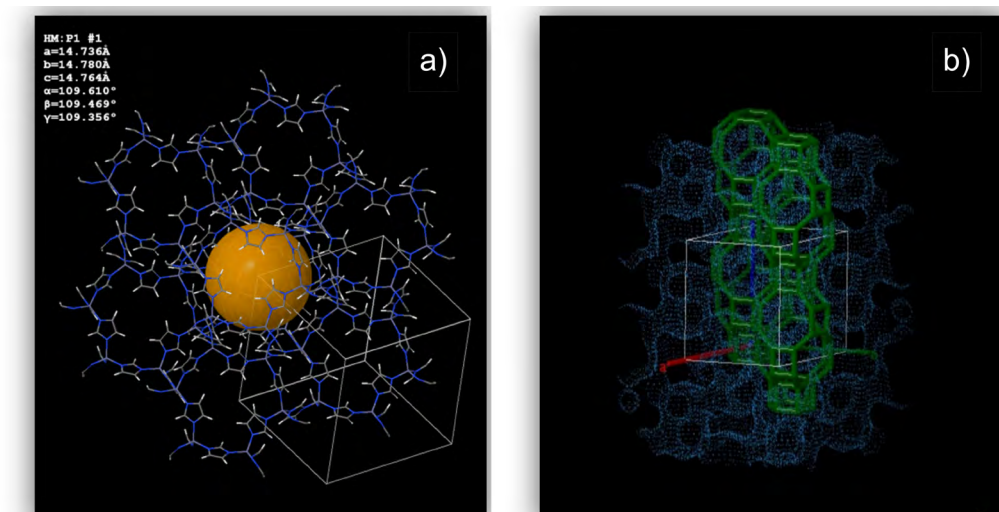
Se ha reportado el uso de zeolitas naturales, como clinoptilolita, epistilbita, erionita y mordenita (Quiroz-Estrada *et al.*, 2016; Hernandez *et al.*, 2015), y sintéticas como zeolitas nanocristalinas NaA (Shakarova *et al.*, 2014), tipo 13X (Garshasbi *et al.*, 2017), LTA, zeolitas tipo RHO dopadas con Cu (Yang *et al.*, 2022), zeolitas Tipo Y y X (Walton *et al.*, 2006), además de algunas otras nanozeolitas intercambiadas con metales de transición (Huong y Lee, 2017; Walton *et al.*, 2006; Bakhtyari *et al.*, 2020).

Por otra parte, las estructuras organometálicas (*Metal Organic Frameworks*, MOF por sus siglas en inglés) son un grupo de materiales cristalinos que tienen redes de coordinación periódicas de una, dos o tres dimensiones construidas por nodos basados en metales (cationes simples o grupos) unidos (enlace covalente coordinado o enlace dativo) con ligandos orgánicos (Mahajan y Lahtinen, 2022; Trickett *et al.*, 2017). Algunas de sus características más excepcionales pueden ser sus densidades ultrabajas, volúmenes de poro de hasta un 90% de espacio libre y áreas superficiales extremadamente grandes de hasta 10,000 m²/g. El diseño de las aperturas de los poros también se ha desarrollado y explotado para que las estructuras sean selectivas hacia el CO₂ en una mezcla de gases (Trickett *et al.*, 2017).

Maia y su equipo de investigación (2021) reportaron la adsorción de CO₂ en estructuras MOF, MOF-74-Mg, HKUST-1, SIFSIX-3-M (M = Fe, Co, Ni, Cu, Zn) y ZIF-8, donde, además de las propiedades texturales idóneas para la adsorción ya mencionadas en ese tipo de materiales, se evaluaron sus interacciones particulares, mediante el análisis de los sitios de adsorción, dinámica molecular, estabilidad de los sitios de agua, mecanismos de descomposición, etc. MOF-74 es el MOF más disponible actualmente con alta capacidad de adsorción de CO₂, pues tiene una excelente selectividad de CO₂ sobre N₂ (Ben-Mansour y Qasem, 2018).

Muchas veces es difícil visualizar el tamaño nanométrico de los poros en los materiales. Si se ponen como ejemplo estructuras organometálicas nanoestructuradas (Figura 4.6a), se puede observar cómo el espacio representado por la esfera amarilla con diámetro de 1.16 nm es el espacio hueco poroso donde puede realizarse la captura de gas, además de que la estructura tiene aperturas de 0.34 nm (Abdel-Magied *et al.*, 2019). En cambio, para una zeolita chabasita (Figura 4.7b), la malla azul representa los canales porosos más amplios interconectados en la estructura interna de este aluminosilicatos; además, al igual que la ZIF-8, la chabasita tiene aperturas de alrededor de 0.34 nm en sus anillos de ocho miembros (Hernández *et al.*, 2022). Estos microporos también actúan como tamices moleculares que permiten la entrada de moléculas de CO₂, con diámetro cinético de 0.33 nm, incluso impiden el paso de CH₄ cuyo diámetro es de 0.38 nm.

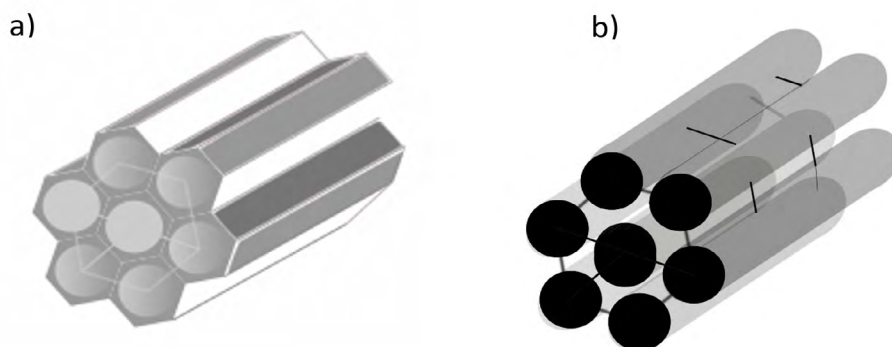
Figura 4.6. Estructuras de algunos materiales porosos tipo a) MOF-SIF8, b) zeolita tipo chabasita



Tomado de: Baerlocher, Ch., *et al.*, (1996) y Greeves, N., (s.f.)

Por otro lado, las estructuras mesoporosas tienen poros más amplios, por ejemplo, el carbono mesoporoso ordenados CMK-3 (Figura 4.7a), formado por nanopipas de carbono interconectadas, o la sílice mesoporosa SBA-15 (Figura 4.7b) (Quiroz-Estrada *et al.*, 2022); su selectividad no depende del diámetro de poro, sino de la fuerza de las interacciones electrostáticas que tengan las moléculas de gas con la superficie del material.

Figura 4.7. Representación de estructuras a) Sílice mesoporosa SBA-15 y b) nanopipas de carbono CMK-3



Fuente: Elaboración propia

Respecto a los adsorbentes a base de carbón, estos tienen una buena capacidad de adsorción para CO_2 a bajas concentraciones y temperatura ambiente. Sin embargo, la capacidad de adsorción se reduce con el aumento de la temperatura, lo que se puede mejorar en gran medida mediante la modificación química. El CO_2 posee un carácter

ácido, por lo que se busca la introducción de sitios básicos induciendo propiedades de dador de electrones. Las funcionalizaciones mayormente aplicadas a los carbones consisten en la adición de grupos funcionales con nitrógeno; esto provoca un aumento en la polaridad superficial del carbón y su basicidad, lo cual se reflejaría en mayores y mejores interacciones entre el carbón y moléculas ácidas como H₂S, SO₂ o CO₂ (Choma et al., 2016).

Algunos de los adsorbentes carbonáceos más estudiados y utilizados para la separación y captura de CO₂ son los carbones activados (Mukherjee et al., 2019), nanofibras de carbono (Ojeda-López et al., 2021), nanotubos de carbono, óxidos de grafeno y grafeno (Khakpay et al., 2017), carbonos mesoporosos ordenados (Quiroz-Estrada et al., 2022) y tamices moleculares de carbono (Donald Carruthers et al., 2012).

Hasta este punto, se ha hablado de la adsorción o captura de CO₂ específicamente, sin embargo, muchos de estos materiales nanoporosos también han sido evaluados para la adsorción y separación de gases como CH₄, NO₂, SO₂, CO, etc., por componente o como parte de un efluente en conjunto. La principal mezcla evaluada es CO₂/CH₄ (Zohdi et al., 2019; Alfe et al., 2021; Kamal et al., 2022). Ejemplo de ello son las membranas para la separación de N₂/CH₄ (Carreon, 2018), nanopartículas de zeolita tipo T para la separación de CO₂/CH₄ (Jiang et al., 2013), la alta selectividad de nanozeolitas tipo beta (β) (Bakhtyari et al., 2020) y la aplicación del *grafting* químico para la funcionalización de la superficie en carbones activados en la captura de SO₂ y NO_x (Abdulrasheed et al., 2018), y algunas otras mezclas adicionales.

En la Tabla 4.2, se puede visualizar la diferencia entre algunos nanomateriales conocidos respecto a la cantidad de CO₂ adsorbido en mmol/g.

Tabla 4.2. Comparativo de la capacidad de adsorción de CO₂ de algunos nanomateriales

Clasificación	Adsorbente poroso	Presión	Cantidad adsorbida mmol/g	Referencia
MOF	IRMOF-3	1 Bar	3.99	(Ding et al., 2016)
	ZJNU-44	1 Bar	5.2	(Song et al., 2015)
	dmen-Mg2(dobpdc)	1 Bar	4.34	(Lee et al., 2015)
Zeolitas	13X	1 Bar	4.8	(Gholipour y Mofarahi, 2016)
	NaY		5.14	
	NaX	1 Bar	7.06	(Yu et al., 2013)

Nanomateriales de carbono	Nanopipas	1 Bar	3.4	(Quiroz-Estrada et al., 2022)
	CMK-3			
	Nanohojas de grafeno	1 Bar	2.89	(Chowdhury y Balasubramanian, 2016)
	Tamices moleculares de carbono	1 Bar	8.6	(Wahby et al., 2010)

5. Conclusiones

La contaminación por emisiones de CO₂ a la atmósfera ha provocado la búsqueda de nuevos y mejores materiales para adsorber gases. Una de las alternativas más llamativas es la manipulación de las estructuras a escala nanométrica que provea de mejores características y propiedades a los materiales. También es necesario que, además de una gran superficie específica y volumen de poro, posea la capacidad de promover interacciones fuertes electrostáticas con los gases en estudio en su superficie hueca porosa. Igualmente, parte de los objetivos del desarrollo tecnológico es la sustentabilidad que busca, aparte de un bajo costo económico y energético, la reutilización y recuperación del material para disminuir el impacto que tiene la síntesis de estos materiales.

6. Referencias

- Abdel-Magied, A. F., Abdelhamid, H. N., Ashour, R. M., Zou, X. y Forsberg, K. (2019). Hierarchical porous zeolitic imidazolate frameworks nanoparticles for efficient adsorption of rare-earth elements. *Microporous and Mesoporous Materials*, 278, 175–184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.11.022>
- Abdulrasheed, A. A., Jalil, A. A., Triwahyono, S., Zaini, M. A. A., Gambo, Y. y Ibrahim, M. (2018). Surface modification of activated carbon for adsorption of SO₂ and NO_x: A review of existing and emerging technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 1067–1085. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.011>
- Alfe, M., Policicchio, A., Lisi, L. y Gargiulo, V. (2021). Solid sorbents for CO₂ and CH₄ adsorption: The effect of metal organic framework hybridization with graphene-like layers on the gas sorption capacities at high pressure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110816. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110816>
- Baerlocher, Ch., y McCusker, L.B. (1996). Database of Zeolite Structures: <http://www.iza-structure.org/databases/>

- Bakhtyari, A., Mofarahi, M. y Lee, C. H. (2020). Chapter 9 - CO₂ adsorption by conventional and nanosized zeolites. En M. R. Rahimpour, M. Farsi y M. Amin Makarem (Eds.), *Advances in Carbon Capture. Methods, Technologies and Applications* (pp. 193-228). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00009-8>
- Ben-Mansour, R. y Qasem, N. A. A. (2018). An efficient temperature swing adsorption (TSA) process for separating CO₂ from CO₂/N₂ mixture using Mg-MOF-74. *Energy Conversion and Management*, 156, 10-24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.010>
- Carreon, M. A. (2018). Molecular sieve membranes for N₂/CH₄ separation. *Journal of Materials Research*, 33(1), 32-43. <https://link.springer.com/article/10.1557/jmr.2017.297>
- Choma, J., Osuchowski, L., Marszewski, M., Dziura, A. y Jaroniec, M. (2016). Developing microporosity in Kevlar®-derived carbon fibers by CO₂ activation for CO₂ adsorption. *Journal of CO2 Utilization*, 16, 17-22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcou.2016.05.004>
- Chowdhury, S. y Balasubramanian, R. (2016). Highly efficient, rapid and selective CO₂ capture by thermally treated graphene nanosheets. *Journal of CO2 Utilization*, 13, 50-60. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcou.2015.12.001>
- Ding, S., Dong, Q., Hu, J., Xiao, W., Liu, X., Liao, L. y Zhang, N. (2016). Enhanced selective adsorption of CO₂ on nitrogen-doped porous carbon monoliths derived from IRMOF-3. *Chemical Communications*, 52(63), 9757-9760. <https://doi.org/10.1039/C6CC04416F>
- Domènech, A. (2010). El azul maya, un antecesor de los materiales híbridos. *Materiales Avanzados*, 15, 9.
- Donald Carruthers, J., Petruska, M. A., Sturm, E. A. y Wilson, S. M. (2012). Molecular sieve carbons for CO₂ capture. *Microporous and Mesoporous Materials*, 154, 62-67. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.07.016>
- Firdaus, R. M., Desforges, A., Rahman Mohamed, A. y Vigolo, B. (2021). Progress in adsorption capacity of nanomaterials for carbon dioxide capture: A comparative study. *Journal of Cleaner Production*, 328, 129553. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129553>
- Flanigen, E. M. (2001). Chapter 2. Zeolites and molecular sieves: An historical perspective. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 137, 11-35. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(01\)80243-3](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(01)80243-3)
- Garshasbi, V., Jahangiri, M. y Anbia, M. (2017). Equilibrium CO₂ adsorption on zeolite 13X prepared from natural clays. *Applied Surface Science*, 393, 225-233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.09.161>
- Gholipour, F. y Mofarahi, M. (2016). Adsorption equilibrium of methane and carbon dioxide on zeolite 13X: Experimental and thermodynamic modeling. *The Journal of Supercritical Fluids*, 111, 47-54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.01.008>

- Greeves, N., (s.f). ZIF Metal Organic Framework, ChemTube3D. <https://www.chem-tube3d.com/mof-zif8/>
- Gregg, S. J. y Sing, K. S. W. (1982). *Adsorption, Surface Area and Porosity*. Academic Press. <https://doi.org/10.1002/bbpc.19820861019>
- Sing, K. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). *Pure and Applied Chemistry*, 57(4), 603–619. <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>
- Gunawardene, O. H. P., Gunathilake, C. A., Vikrant, K. y Amaraweera, S. M. (2022). Carbon Dioxide Capture through Physical and Chemical Adsorption Using Porous Carbon Materials: A Review. *Atmosphere*, 13(3), 397. <https://doi.org/10.3390/atmos13030397>
- Hernandez, M. A., Pestryakov, A., Portillo, R., Salgado, M. A., Rojas, F., Rubio, E., Ruiz, S. y Petranovskii, V. (2015). CO₂ Sequestration by Natural Zeolite for Greenhouse Effect Control. *Procedia Chemistry*, 15, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.10.006>
- Hernández, M. Á., Quiroz-Estrada, K., Hernandez-Salgado, G. I., Portillo, R. I., Santamaría-Juárez, J. D., Velasco, M. D., Rubio, E. y Petranovskii, V. (2022). Nanoporosity and Isothermic Enthalpy of Adsorption of CH₄, H₂, and CO₂ on Natural Chabazite and Exchanged. *Separations*, 9(6), 150. <https://doi.org/10.3390/separations9060150>
- Huong, P. T. y Lee, B. K. (2017). Improvement of selective separation of CO₂ over N₂ by transition metal-exchanged nano-zeolite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 241, 155–164. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.12.038>
- Jiang, Q., Rentschler, J., Sethia, G., Weinman, S., Perrone, R. y Liu, K. (2013). Synthesis of T-type zeolite nanoparticles for the separation of CO₂/N₂ and CO₂/CH₄ by adsorption process. *Chemical Engineering Journal*, 230, 380–388. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.103>
- Kamal, K. M., Narayan, R., Chandran, N., Popović, S., Nazrulla, M. A., Kovač, J., Vrtovec, N., Bele, M., Hodnik, N., Kržmanc, M. M. y Likožar, B. (2022). Synergistic enhancement of photocatalytic CO₂ reduction by plasmonic Au nanoparticles on TiO₂ decorated N-graphene heterostructure catalyst for high selectivity methane production. *Applied Catalysis B. Environmental*, 307, 121181. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337322001217?via%3Dihub>
- Keller, J. y Staudt, R. (2005). *Gas Adsorption Equilibria. Experimental Methods and Adsorptive Isotherms*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/b102056>
- Kerker, M. y Kratochvil, J. P. (1983). Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units: Appendix II definitions, terminology and symbols in colloid and surface chemistry: Part 1.14: Light scattering. *Pure and Applied Chemistry*, 55(6), 931–941. <https://doi.org/10.1351/pac198355060931>
- Khakpay, A., Rahmani, F., Nouranian, S. y Scovazzo, P. (2017). Molecular Insights on the CH₄/CO₂ Separation in Nanoporous Graphene and Graphene Oxide Separation Platforms: Adsorbents versus Membranes. *The Journal of Physical Chemistry C*, 121(22), 12308–12320. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b03728>
- Kumar, S., Srivastava, R. y Koh, J. (2020). Utilization of zeolites as CO₂ capturing agents: Advances and future perspectives. *Journal of CO2 Utilization*, 41, 101251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101251>

- Lee, W. R., Jo, H., Yang, L.-M., Lee, H., Ryu, D. W., Lim, K. S., Song, J. H., Min, D. Y., Han, S. S., Seo, J. G., Park, Y. K., Moon, D. y Hong, C. S. (2015). Exceptional CO₂ working capacity in a heterodiamine-grafted metal-organic framework. *Chemical Science*, 6(7), 3697-3705. <https://doi.org/10.1039/C5SC01191D>
- Lu, G. Q. y Zhao, X. S. (2004). *Nanoporous materials - An Overview*. In *Nanoporous materials: Science and Engineering*. College Press. https://doi.org/10.1142/9781860946561_0001
- Mahajan, S. y Lahtinen, M. (2022). Recent progress in metal-organic frameworks (MOFs) for CO₂ capture at different pressures. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108930. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108930>
- Maia, R. A., Louis, B., Gao, W. y Wang, Q. (2021). CO₂ adsorption mechanisms on MOFs: a case study of open metal sites, ultra-microporosity and flexible framework. *Reaction Chemistry & Engineering*, 6(7), 1118-1133. <https://doi.org/10.1039/D1RE00090J>
- Mohammed, I. S., Afagwu, C., Adjei, S., Kadafur, I. B., Jamal, M. S. y Awotunde, A. A. (2020). A review on polymer, gas, surfactant and nanoparticle adsorption modeling in porous media. *Rev. IFP Energies nouvelles*, 75 (77), <https://doi.org/10.2516/ogst/2020063>
- Mukherjee, A., Okolie, J. A., Abdelrasoul, A., Niu, C. y Dalai, A. K. (2019). Review of post-combustion carbon dioxide capture technologies using activated carbon. *Journal of Environmental Sciences*, 83, 46-63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.03.014>
- Ojeda-López, R., Ramos-Sánchez, G., García-Mendoza, C., C. S. Azevedo, D., Guzmán-Vargas, A. y Felipe, C. (2021). Effect of Calcination Temperature and Chemical Composition of PAN-Derived Carbon Microfibers on N₂, CO₂, and CH₄ Adsorption. *Materials*, 14(14), 3914. <https://doi.org/10.3390/ma14143914>
- Quiroz-Estrada, K., Esparza-Schulz, M. y Felipe, C. (2022). A Better Understanding of the SBA-15 Pores Filling through Textural Changes in CMK-3 Carbon Synthesis and Its CO₂:CH₄ Adsorption Selectivity. *Journal of Composites Science*, 6(11), 344. <https://doi.org/10.3390/jcs6110344>
- Quiroz-Estrada, K., Hernandez, M. A., Portillo Reyes, R., Rubio, E. y Petranoskii, V. (2016). Comparación de la capacidad de secuestro de CO₂ en Clinoptilolita, Epistilbita, Erionita, Mordenita y Caolinita como constituyentes del suelo. *Superficies y Vacío*, 29, 55-61.
- Russel, W. W. (1944). The Adsorption of Gases and Vapors. Volume I: Physical Adsorption (Brunauer, Stephen). *Journal of Chemical Education*, 21(1), 52. <https://doi.org/10.1021/ed021p52.1>
- Shakarova, D., Ojuva, A., Bergström, L. y Akhtar, F. (2014). Methylcellulose-Directed Synthesis of Nanocrystalline Zeolite NaA with High CO₂ Uptake. *Materials*, 7(8), 5507-5519. <https://doi.org/10.3390/ma7085507>

- Song, C., Hu, J., Ling, Y., Feng, Y., Krishna, R., Chen, D. y He, Y. (2015). The accessibility of nitrogen sites makes a difference in selective CO₂ adsorption of a family of isostructural metal-organic frameworks. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(38), 19417–19426. <https://doi.org/10.1039/C5TA05481H>
- Songolzadeh, M., Ravanchi, M. T. y Soleimani, M. (2012). Carbon Dioxide Capture and Storage: A General Review on Adsorbents. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 6, 900–907.
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J. y Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10). <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- Trickett, C. A., Helal, A., Al-Maythalony, B. A., Yamani, Z. H., Cordova, K. E. y Yaghi, O. M. (2017). The chemistry of metal-organic frameworks for CO₂ capture, regeneration and conversion. *Nature Reviews Materials*, 2(8), 17045. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.45>
- ScienceDirect. (2007). *The National Nanotechnology Initiative: strategic plan*. National Science and Technology Council. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2017.04.005>
- Vaz, S., Rodrigues de Souza, A. P. y Lobo Baeta, B. E. (2022). Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100456. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456>
- Wahby, A., Ramos-Fernández, J. M., Martínez-Escandell, M., Sepúlveda-Escribano, A., Silvestre-Albero, J. y Rodríguez-Reinoso, F. (2010). High-surface-area carbon molecular sieves for selective CO₂ adsorption. *ChemSusChem*, 3(8), 974–981. <https://doi.org/10.1002/cssc.201000083>
- Walton, K. S., Abney, M. B. y Douglas LeVan, M. (2006). CO₂ adsorption in Y and X zeolites modified by alkali metal cation exchange. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91(1), 78–84. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.11.023>
- Wang, X., He, T., Hu, J. y Liu, M. (2021). The progress of nanomaterials for carbon dioxide capture via the adsorption process. *Environmental Science: Nano*, 8(4), 890–912. <https://doi.org/10.1039/D0EN01140A>
- Yang, H., Fang, X., Li, Z., Sun, H. y Chen, H. (2022). Copper-Doped Small Pore Zeolites for CO₂ Capture by Honeycomb Rotor with Low Temperature Regeneration. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(5), 1759–1764. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c08347>
- Yu, L., Gong, J., Zeng, C. y Zhang, L. (2013). Synthesis of binderless zeolite X microspheres and their CO₂ adsorption properties. *Separation and Purification Technology*, 118, 188–195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.06.035>
- Zabukovec Logar, N. y Kaučič, V. (2006). Nanoporous materials: from catalysis and hydrogen storage to wastewater treatment. *Acta Chimica Slovenica*, 53(2), 117–135.

- Zhang, X., Qin, N., Ye, E., Guan, G., Han, M. Y. y Li, Z. (2022). Nanotechnology for CO₂ Capture, Storage, and Conversion. En Z. Li, J. Zheng y E. Ye (Eds.), *Sustainable Nanotechnology*. The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781839165771-00065>
- Zohdi, S., Anbia, M. y Salehi, S. (2019). Improved CO₂ adsorption capacity and CO₂/CH₄ and CO₂/N₂ selectivity in novel hollow silica particles by modification with multi-walled carbon nanotubes containing amine groups. *Polyhedron*, 166, 175–185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.poly.2019.04.001>

CAPÍTULO 5

NANOMATERIALES PARA EL APROVECHAMIENTO DE GASES CONTAMINANTES

Eric Aguilar García¹, Hernani Yee-Madeira¹

1. Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional, Col. San Pedro Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, Ciudad de México, C.P. 07738, México.

1. Introducción

Actualmente, la contaminación ambiental es un problema que afecta a toda la población del planeta, provocando graves problemas de salud, así como daños irreversibles a ecosistemas terrestres y marinos. Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, la principal causa es la actividad humana, en especial la industria, agricultura, ganadería, generación de energía, producción de alimentos, entre otras. Aunque el problema está plenamente identificado y estudiado, la tendencia del incremento poblacional indica que, para satisfacer las necesidades básicas de esta, las actividades también seguirán en aumento, provocando que la contaminación ambiental se eleve hasta niveles muy críticos en los próximos años (Organización Mundial de la Salud, 2019).

La contaminación del aire se genera principalmente por la emisión de gases originados de procesos químicos, donde se usan combustibles de origen fósil como gasolina, diésel, carbón y queroseno, además de otras actividades industriales, ganaderas y agrícolas. Los gases que se emiten en mayor cantidad son el dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y monóxido de carbono (CO). Por otro lado, existe un gas que es altamente contaminante y tóxico que se encuentra de forma natural en los yacimientos de petróleo, gas natural, redes de alcantarillado público, fosas sépticas, erupciones volcánicas, entre otros, en porcentajes que pueden llegar hasta el 3% en masa: el sulfuro de hidrógeno (H_2S). Este está altamente regulado

por instancias internacionales debido a los problemas que puede causar, por ejemplo, intoxicaciones en periodos de tiempos cortos a concentraciones muy bajas, que pueden provocar la muerte. Además, cuando se libera al ambiente, reacciona con el agua de la humedad del aire, formando óxidos de azufre que son precursores de la lluvia ácida (Moore, 2009).

Durante años se ha intentado reducir la emisión de estos gases contaminantes, disminuyendo el consumo energético, mejorando y optimizando los procesos de industriales; esto tiene la finalidad de obtener menores cantidades de residuos y aprovechar de mejor manera las materias primas, incluyendo combustibles, a través de inculcar en la sociedad el uso eficiente de la energía (Suchecki, 1994). Por otro lado, se han desarrollado diversas metodologías para eliminar estos gases contaminantes a través de diferentes procesos fisicoquímicos, como la adsorción; para ello, se utilizan materiales de diferente naturaleza, obteniendo resultados muy prometedores, tal como se mencionó en el capítulo anterior.

En años recientes se ha buscado implementar metodologías donde, aparte de eliminar los gases contaminantes y tóxicos, se puedan aprovechar como materia prima y obtener nuevos compuestos con un valor agregado y que a su vez sirvan para fabricar productos con aplicaciones en diversas áreas. Desde este punto de vista, se genera una gran área oportunidad, ya que se pueden transformar en productos útiles para la sociedad.

2. Nanomateriales para el aprovechamiento de CO₂

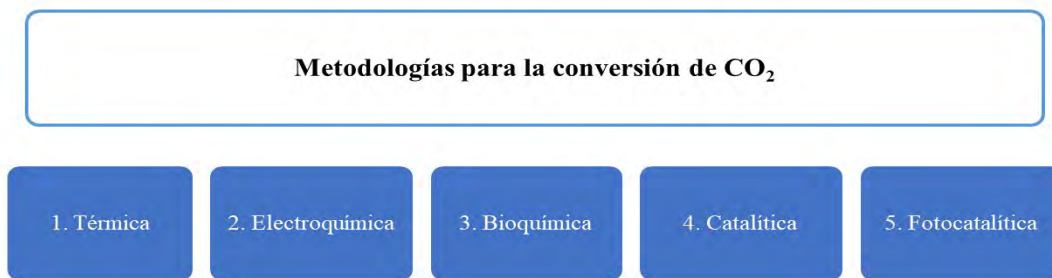
El CO₂ es el gas contaminante que se emite en mayores cantidades a nivel mundial. Existen diversas fuentes de emisión a la atmósfera, que pueden clasificarse en fuentes naturales y artificiales (antropogénicas). Las fuentes naturales pueden ser la descomposición de materia orgánica, respiración de animales y plantas, erupciones volcánicas y liberación oceánica, mientras que las fuentes antropogénicas son las actividades industriales, deforestación y uso de combustibles fósiles como gasolina, diésel, carbón y gas natural para la generación de energía, movilidad y transporte (Nathanael, 2021).

Desde hace varias décadas se han desarrollado metodologías para aprovechar el CO₂ como materia prima y precursor de nuevos compuestos. En general, el modo de empleo del CO₂ se puede clasificar en dos grupos: I) uso directo, sin conversión del CO₂, y II) uso mediante un proceso de conversión de CO₂. En el uso directo el CO₂ se emplea sin ningún cambio químico alguno, donde principalmente se usa como solvente, refrigerante, fluido supercrítico para sistemas de energía, materia prima de urea y fertilizantes, uso médico, alimentos y bebidas, extintores, entre otras (McDowell, 2010).

Por otro lado, mediante los procesos de conversión, el CO_2 se transforma completamente en otros compuestos, por ejemplo, combustibles (metano, gasolina o diésel), productos químicos (metanol), polímeros, cemento, carbonatos y minerales, o intermedarios químicos; así mismo, por medio de procesos de conversión biológica, se obtienen fertilizantes para el cultivo de algas (Gulzar, 2020).

En la Figura 5.1, se muestran las principales metodologías para convertir el CO_2 en diferentes productos.

Figura 5.1. Metodologías empleadas para la conversión de CO_2



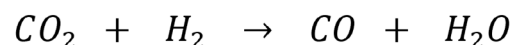
Fuente: Elaboración propia basada en la publicación de Saleh (2022).

De estas cinco metodologías, tanto la conversión catalítica y fotocatalítica emplean diversos materiales y nanomateriales en fase sólida con forma de polvos o granulados de diferentes tamaños como catalizadores, es decir, aceleran las reacciones químicas para llevar a cabo tal transformación en diferentes compuestos y productos en tiempos menores, con mayor eficiencia y rendimiento.

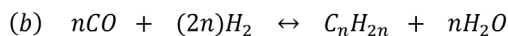
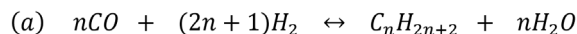
I. Nanomateriales para la conversión catalítica de CO_2

La conversión catalítica de CO_2 ocurre principalmente por dos procesos para producir hidrocarburos: I) transformación usando una síntesis de Fischer-Tropsch a través de la reacción inversa de desplazamiento de vapor de agua (RWGS, por sus siglas en inglés), seguida de una reacción de craqueo por isomerización y aromatización para obtener hidrocarburos (ecuación 1 y 2); II) transformación de CO_2 a metanol (CH_3OH) (ecuación 3) y su posteriormente conversión a diferentes tipos de hidrocarburos; y III) reducción por electrocatálisis de CO_2 para producir metano (CH_4), también llamada reacción de metanación (ecuación 4), además de obtener otros compuestos orgánicos intermedarios precursores de hidrocarburos (Saleh, 2022).

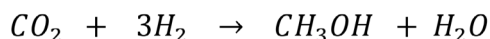
Ecuación 1. Reacción inversa de desplazamiento de vapor de agua (RWGS)



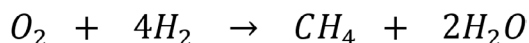
Ecuación 2. (a) Reacción de Fischer-Tropsch para producir parafinas (alcanos) y (b) para producir olefinas (alquenos)



Ecuación 3. Conversión de O_2 a metanol y agua



Ecuación 4. Metanación de CO_2



En los tres procesos, es fundamental el empleo de catalizadores sólidos altamente activos que permitan la mayor conversión posible del CO_2 a los diferentes productos. Para los dos primeros procesos, los nanomateriales a base carbón son los más usados: nanopartículas de grafeno en fase óxido y reducido, nanotubos de carbono (Lee, 2017) y nitruros de carbono grafitico (Tang, 2019); estos ya sea en su forma pura (libre de metales) o funcionalizados con nanopartículas de metales, mayormente de transición como oro (Au), plata (Ag), paladio (Pd), cobre (Cu), níquel (Ni) y platino (Pt).

Por otro lado, también se han empleado nanomateriales inorgánicos que, debido a su naturaleza y procesos de síntesis, permiten la obtención de materiales con superficies específicas elevadas y morfología variada: nanopartículas esféricas, nanotubos, nanocubos y nanocapas. La composición química de estos nanomateriales se basa en óxido de silicio (SiO_2), óxido de titanio (TiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3), los cuales también pueden ser modificados o funcionalizados con los metales de transición antes mencionados (Saleh, 2022).

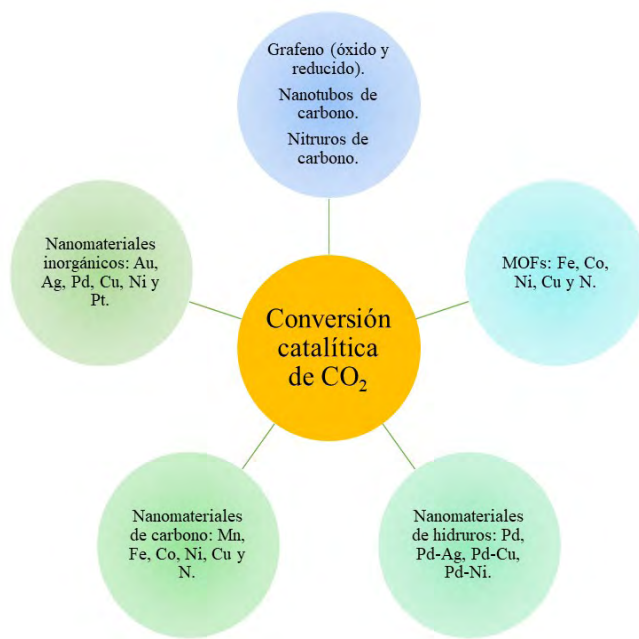
Para el proceso de obtención de metano y otros compuestos orgánicos por electrocatalisis, se deben emplear catalizadores que sean activos eléctricamente y permitan la reducción del CO_2 . Por ejemplo, Ju (2017) sintetizó nanomateriales de carbono dopados con nitrógeno (N) y diferentes metales como Manganese (Mn), Hierro (Fe), Cobalto (Co), Ni y Cu, con resultados prometedores. También se han usado nanocatalizadores de metales nobles, como Sheng (2018), quien usó hidruro de paladio (PdH), mientras que Wang (2019) sintetizó Pd soportado en carburos metálicos y Lee (2019) obtuvo hidruros bimetalicos de Pd con Ag, Cu y Ni. En estos trabajos se obtuvieron nanomateriales con excelentes propiedades que permitieron la fácil conversión del CO_2 hacia CH_4 .

Por otro lado, los nanomateriales de Estructuras Metal-Orgánicas (MOFs por sus siglas en inglés) también son una alternativa para la conversión de CO_2 . Como ejemplo, se han utilizado MOFs nanoestructurados modificados con nanopartículas de Cu

(Kim, 2019), mientras que Jiao (2020) sintetizó MOFs dopados con N y modificados con metales como Fe, Ni, Co y Cu.

Los principales nanomateriales usados en la conversión catalítica, mencionados en los párrafos anteriores, se resumen en la Figura 5.2.

Figura 5.2. Principales nanomateriales usados en la conversión catalítica del CO₂



Fuente: Elaboración propia basado en la publicación de Saleh (2022)

II. Nanomateriales para la conversión fotocatalítica de CO₂

La conversión fotocatalítica, también llamada fotoreducción de CO₂, se basa en el uso de catalizadores sólidos que sean capaces de activarse mientras absorben radiación electromagnética en el rango del ultravioleta y visible (UV-Vis). Para esto, se emplean materiales y nanomateriales basados en elementos semiconductores, además de sistemas de irradiación con lámparas de xenón (Xe) o simuladores solares en el rango del espectro electromagnético del UV-Vis (Zhang, 2021).

En la fotoreducción del CO₂ para producir CH₄, se han empleado diversos materiales: hidrotalcitas de magnesio (Mg) y aluminio (Al) como soportes de nanopartículas de rutenio (Ru) (Teramura, 2012), nanotubos de silicio impregnados con nanopartículas de rutenio (O'Brien, 2018), además de nanopartículas de óxido de níquel (NiO), óxido

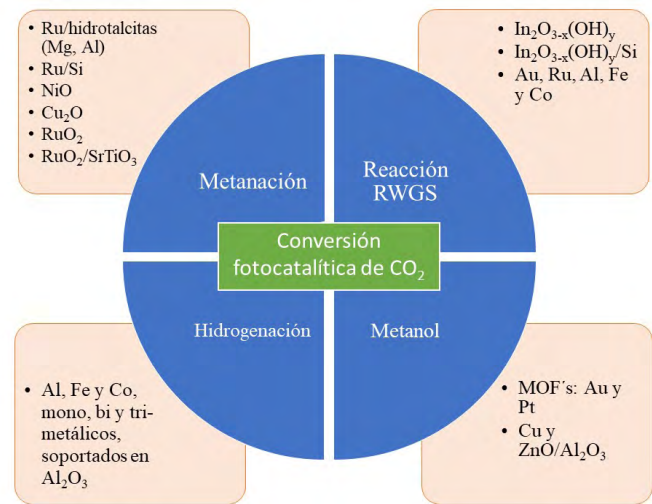
de cobre (Cu_2O) y óxido de rutenio (RuO_2); así mismo, se ha reportado la deposición de nanopartículas de dióxido de rutenio (RuO_2) en titanato de estroncio (SrTiO_3) (Mateo, 2021). Todos estos nanomateriales han demostrado gran actividad con conversiones a la obtención de CH_4 mayores del 90% en condiciones de presiones ambientales y temperaturas que van de los 100 °C a los 350 °C, es decir, condiciones “suaves” para llevar a cabo la fotoreducción del CO_2 .

Por otro lado, por fotocatalisis también se puede llevar a cabo la reacción de RWGS para obtener CO y, posteriormente, transformarlo en metanol. Para esta reacción, se han empleado nanoestructuras de óxido de indio hidroxilado ($\text{In}_2\text{O}_{3-x}(\text{OH})_y$) (He, 2016), soportadas en nanotubos de silicio ($\text{In}_2\text{O}_{3-x}(\text{OH})_y/\text{Si}$) (Hoch, 2016). Los metales plasmónicos como Au, Ru, Al, Fe o Co en forma de nanopartículas son excelentes donadores de electrones en presencia de luz y provocan la activación del CO_2 en esta reacción (Zhang, 2016). En general, los resultados obtenidos en estos trabajos de investigación han logrado resultados muy prometedores, en especial porque se realizaron bajo condiciones de presión atmosférica y temperaturas que no rebasan los 200 °C.

Adicionalmente, se pueden realizar otras reacciones de conversión fotocatalítica como la hidrogenación de CO_2 para producir hidrocarburos usando nanopartículas de Al, Fe y Co, de manera individual o combinada (bi y tri-metálicos), soportadas en Al_2O_3 (Liu, 2016), además de la obtención directa de metanol, donde se han usado nanomateriales MOFs dopados con Pt y Au, y nanopartículas de Cu y óxido de zinc (ZnO) impregnados en Al_2O_3 (Xie, 2020).

En la Figura 5.3 se muestran los diferentes nanomateriales empleados para la fotoreducción de CO_2 .

Figura 5.3. Nanomateriales utilizados en la conversión fotocatalítica de CO_2



Fuente: Elaboración propia basada en la publicación de Zhang (2021)

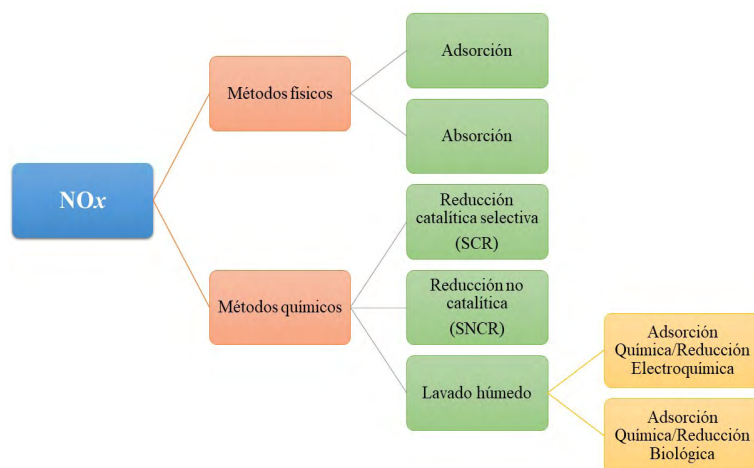
El aprovechamiento del CO₂ como materia prima y la obtención de compuestos valiosos han tenido un gran desarrollo en los últimos años, con resultados que prometen ayudar a mitigar la emisión de CO₂; sin embargo, falta trabajo por hacer para implementar estas metodologías a gran escala y con mayor eficiencia.

3. Nanomateriales para el aprovechamiento de NO_x

Los NO_x son los óxidos de nitrógenos (NO y NO₂) producidos principalmente por la quema de combustibles fósiles, que causan diversas afectaciones al medio ambiente, como la creación de ozono fotoquímico (esmog) (Richter, 2005). De estos dos gases, el NO₂ es el más contaminante, tóxico e irritante, y precursor de la formación de partículas de nitrato, que producen ácidos y elevados niveles de material particulado menor a 2.5 µm (PM_{2.5}) en el ambiente, provocando problemas en las vías respiratorias de los seres vivos (Zhang, 2015). Esta sustancia es un oxidante fuerte y reacciona violentamente con materiales combustibles y reductores, pudiendo atacar materiales metálicos en presencia de agua. Los dos óxidos presentan buena solubilidad en agua, reaccionando y formando ácido nítrico (HNO₃), presente en la lluvia ácida (Ali, 2021).

Ante estos problemas que generan estos compuestos, al igual que con el CO₂, se han implementado metodología para eliminarlos mediante su captura y aplicación directa en diferentes procesos. Así mismo, desde hace más de cuatro décadas, se ha intentado aprovechar los NO_x como materia prima y precursores de otros compuestos o productos. En la Figura 5.4 se presentan las formas más comunes para el abatimiento de los NO_x.

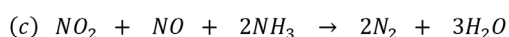
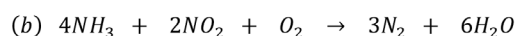
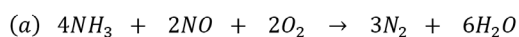
Figura 5.4. Metodologías empleadas para la eliminación y aprovechamiento de los NO_x



Fuente: Elaboración propia basada en la publicación de Ali (2021)

De las metodologías mencionadas en la Figura 5.4, la más usada a nivel mundial para el aprovechamiento de los NOx es la conversión catalítica, específicamente una reducción catalítica selectiva (SCR, por sus siglas en inglés), usando materiales y nanomateriales funcionalizados, con características y propiedades que le brinden actividad catalítica y estabilidad durante el proceso. En esta técnica, los NOx son mezclados con amoníaco y aire, activados con un catalizador y altas temperaturas hasta de 1000 °C; los productos obtenidos son nitrógeno y agua (Nakajima, 1996), tal como se ve en las ecuaciones 5 (a-c):

Ecuación 5



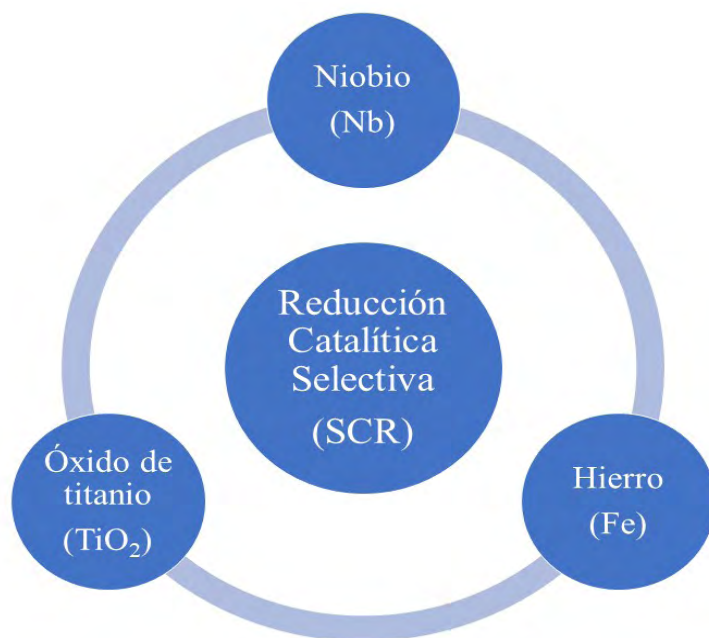
Reacciones en la reducción catalítica selectiva de los NOx

La presencia de catalizadores en esta reacción es de vital importancia, ya que aportan los sitios activos para acelerar la reacción. El catalizador más utilizado es el óxido de niobio (V) (Nb₂O₅) en su forma pura (Murayama, 2014) o dopado con nanopartículas de óxido de hierro (III) (Fe₂O₃) (Okazaki, 1985), logrando excelentes conversión y selectividad en la formación de N₂. Por otro lado, Ma (2015) sintetizó zirconatos de cerio (ZrOx) promovido con nanopartículas de niobio (Nb), consiguiendo realizar la reacción a una temperatura menor de 460 °C y con excelente selectividad a la producción de N₂. Mosrati (2018) observó que, cuando dopaba catalizadores a base de cerio (Ce) y titanio (Ti) con nanopartículas de Nb, las cuales quedaban muy bien dispersas, lograba mayor actividad catalítica. Li (2016) modificó catalizadores de Mn/TiO₂ con nanopartículas de Nb, consiguiendo que el catalizador fuera eficiente y resistente a la contaminación y desactivación por envenenamiento. Así mismo, se observó que con la mezcla de óxidos mixtos de Mn y Nb se logran altas conversiones y selectividad a N₂ (Lian, 2014).

Como se apreció en el párrafo anterior, el uso de Nb en diferentes formas es muy amplio, ya que ha demostrado obtener conversiones a la producción de N₂ por arriba del 90%, mostrando resistencia a la desactivación. En años recientes, se han sintetizado nanomateriales alternativos de fácil acceso, es decir, con metales que sean más abundantes en la Tierra y, por lo tanto, más económicos, por ejemplo, óxidos de hierro funcionalizados. En este sentido, Wang (2020) empleó nanopartículas de Fe₂O₃ e hidróxido de hierro (III) (Fe(OH)₃) funcionalizados con iones de sulfatos (SO₄²⁻), mientras que Jia (2021) modificó nanopartículas de Fe₂O₃ con ácido sulfúrico (H₂SO₄) y con metales como Cu, Co, Mn y Ce; se obtuvieron en ambos trabajos resultados comparables con los basados en Nb en términos conversión y selectividad, además de llevar a cabo la reacción a temperaturas de entre 250 y 450 °C.

El TiO_2 también ha demostrado excelente actividad en la reducción de los NO_x , por ejemplo, se han usado sílice mesoporosas tipo MCM-41 (Signoretto, 2010) y Al_2O_3 (Shelimov, 2008) como soporte para dispersar nanopartículas de TiO_2 mostrando conversión de hasta al 60%; así mismo, Zhang (2011) obtuvo nanopartículas con forma de rodillos de composites de $\text{N-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, llegando a conversiones similares a los antes mencionados. Por otro lado, el TiO_2 en combinación de metales como Rh, Pt, Pd, Fe, Cu y Ag (Kominami, 2008) ha demostrado muy buena actividad, además de que la morfología y propiedades del TiO_2 se ven poco modificadas, lo que se traduce en mayor estabilidad de los nanocatalizadores. En la Figura 5.5 se resumen los principales componentes de los nanocatalizadores en la reacción de SCR de los NO_x .

Figura 5.5. Materiales base de los principales nanocatalizadores usados en la reacción de SCR de los NO_x



Fuente: Elaboración propia basado en los trabajos de Ali (2021) y Balbuena (2015).

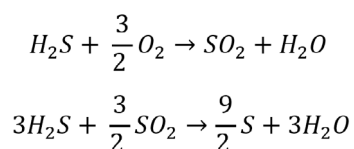
Al igual que para el CO_2 , los resultados de la reducción catalítica de los NO_x dan lugar a pensar que puede reducir la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, no solo removiéndolos, sino también aprovechándolos como una materia prima para otros productos o compuestos que son usados en diferentes áreas de la industria; además, es una metodología en desarrollo con resultados prometedores.

4. Nanomateriales para el aprovechamiento de H_2S

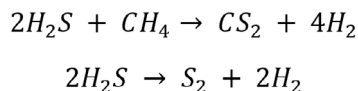
Como se mencionó al inicio de este capítulo, el H_2S es un gas corrosivo y tóxico, con olor característico a huevo podrido. Este puede producirse de manera natural en zonas volcánicas y yacimientos de gas natural, o por la actividad industrial, principalmente durante la extracción y refinamiento del petróleo. Es venenoso a concentraciones muy bajas y, debido a que afecta al bulbo olfatorio, se pierde la sensibilidad del olfato, provocando que las personas expuestas no detecten su olor, lo que lleva a intoxicaciones graves y súbitas; incluso, en tiempos cortos de exposición puede causar la muerte. Además, cuando es liberado al medio ambiente, reacciona con el agua de la humedad del aire, convirtiéndose en H_2SO_4 y provocando la creación de la lluvia ácida (Beauchamp, 1984).

Por los problemas que causa este gas, existen regulaciones muy estrictas sobre su extracción, uso, almacenaje y emisión. Aunque es inevitable la presencia y producción de H_2S durante la refinación del petróleo y extracción de gas natural, también se han hecho esfuerzos para aprovecharlo como materia prima. Los tres principales métodos para su aprovechamiento son: la oxidación parcial a través del proceso Claus (Ecuación 6), reformado con CH_4 (Ecuación 7) y la descomposición (Ecuación 8) (De Crisci, 2019), los cuales se ilustran en el diagrama de la Figura 5.6.

Ecuación 6. Proceso Claus



Ecuación 7. Reformado de H_2S con CH_4



Ecuación 8. Descomposición del sulfuro de hidrógeno

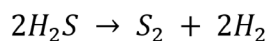


Figura 5.6. Principales metodologías para el aprovechamiento de H_2S



Fuente: Elaboración propia basado en la publicación de De Crisci (2019)

De las tres metodologías mencionadas, la oxidación parcial del H_2S es la más desarrollada industrialmente, en la que este gas se mezcla con oxígeno; mediante varias etapas catalíticas, es decir, usando catalizadores (el más usado es el sulfuro de molibdeno [MoS_2]), se obtiene azufre elemental (S) y agua (Zhang, 2015). Por otro lado, el reformado de H_2S con CH_4 es un proceso que en años recientes ha llamado la atención de diferentes grupos de investigación debido a que obtiene H_2 , una materia prima también muy solicitada en diferentes áreas de la industria, como la petroquímica, de fertilizantes, química, de alimentos, entre otras, además de que puede ser usada como combustibles con ventajas ecológicas: mayor producción de energía comparada con la gasolina (casi tres veces más) y durante su combustión solo se produce agua como producto. De igual manera, para este proceso son de vital importancia los catalizadores metálicos de Pt, Pd, Cr, Fe, Co, Ni, Al, Zr y La, soportados en fases de Al_2O_3 , sílices (SiO_2) o TiO_2 (De Crisci, 2019).

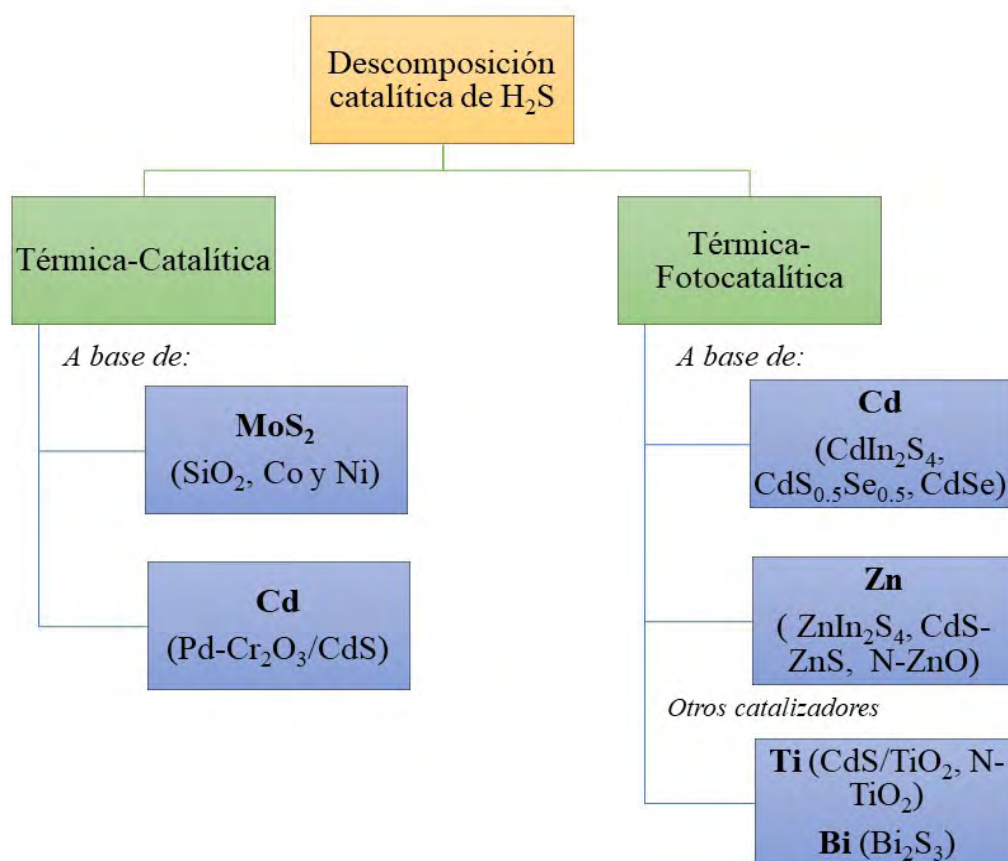
La descomposición de H_2S es una de las metodologías más estudiadas para aprovechar este gas, desde los años 60. Se pueden dividir en dos procesos: catalíticos y no catalíticos. En los procesos no catalíticos solo se usan altas temperaturas para descomponer el gas, logrando conversiones del 20 y 35% a 1000 y 1200 °C, respectivamente; mientras que para alcanzar conversiones del 50% se necesitan temperaturas por arriba de 1400 °C. Debido a esto, existen muchas limitantes, sin embargo, con el uso de nanomateriales como catalizadores se ha logrado obtener conversiones superiores al 50% a temperaturas de entre 600 y 800 °C (Faraji, 1998).

Kwok (2018) sintetizó nanoesferas de MoS_2 recubiertas con nanocapas de SiO_2 , además, las dopó con Co y Ni, obteniendo sistemas híbridos de nanopartículas de Co o Ni/ $\text{SiO}_2/\text{MoS}_2$, con lo cual alcanzó conversiones de 54% a 800 °C y con estabilidad por más de 12 horas de reacción. Los nanocatalizadores basados en cadmio (Cd) también han sido una gran alternativa para este proceso. Por ejemplo, Kanade (2006) obtuvo nanopartículas de sulfuro de cadmio (CdS), mientras que Yao (2011) obtuvo nanocompositos de óxido de cromo dopados con paladio y mezclados con CdS ($\text{Pd-Cr}_2\text{O}_3/\text{CdS}$); ambos trabajos con conversiones superiores a las obtenidas por la descomposición térmica no catalítica.

Por otro lado, la fotocatalisis para el aprovechamiento del H_2S empleando nanocatalizadores también se ha desarrollado en años recientes: Kale (2006) obtuvo nanotubos de sulfuro de cadmio (Cd) e indio (In) (CdIn_2S_4); por otro lado, Apte (2014) sintetizó nanosistemas de puntos cuánticos de cristales de S, Cd y selenio (Se) de la forma $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$ y CdSe , logrando los dos sistemas de nanocatalizadores conversiones entre 16 y 26% a la producción de H_2 . Así mismo, se han usado diferentes tipos de materiales a base de zinc, como nanopartículas de sulfuros de Zn e In (ZnIn_2S_4) (Chaudhari, 2011), nanomateriales tipo núcleo-cáscara con núcleo de TiO_2 y recubierto con CdS-ZnS; por su parte, Bhirud (2012) obtuvo nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) dopado con N. En estos trabajos, además de obtener nanocatalizadores efectivos en la descomposición de H_2S , consiguieron materiales con excelentes propiedades electrónicas.

Otros nanocatalizadores usados son a base de Ti, como nanocristales de TiO_2 , nanocompositos de CdS/ TiO_2 y nanoestructuras de TiO_2 dopado con N con morfología de flor. Por otro lado, el bismuto (Bi) en forma de sulfuro (Bi_2S_3) con morfología de diente de león y nanotubos ha logrado muy buenas conversiones para la obtención de H_2 (Farrukh, 2020). En la Figura 5.7 se resumen los catalizadores usados en la descomposición de H_2S .

Figura 5.7. Nanocatalizadores más usados en la descomposición de H_2S para producir H_2 y S



Fuente: Elaboración propia basado en publicación de Farrukh, 2020

5. Conclusiones

Actualmente, el uso de combustibles fósiles es indispensable para el funcionamiento de la sociedad, aunque diferentes grupos de investigación, gobiernos e instituciones privadas están haciendo esfuerzos enormes para obtener energía a partir de fuentes alternativas, amigables con el ambiente y renovables, así como uso de combustibles no contaminantes, como el hidrógeno. Todavía queda trabajo por hacer y problemas que solucionar. Sin embargo, el desarrollo tecnológico ha permitido crear procesos que reducen contaminantes o se aprovechan para obtener productos de gran valor, usando el desarrollo de la nanotecnología como un potenciador, con lo cual se obtienen resultados favorables y alentadores.

6. Referencias

- Ali, M., Hussain, I., Mehmud, I., Umair, M., Hu, S. y Sharif, H. M. A. (2021). Recent breakthroughs and advancements in NO_x and SO_x reduction using nanomaterials-based technologies: a state-of-the-art review. *Nanomaterials*, 11(12), 3301.
- Apte, S. K., Garaje, S. N., Naik, S. D., Waichal, R. P., Baeg, J. O. y Kale, B. B. (2014). Quantum confinement controlled solar hydrogen production from hydrogen sulfide using a highly stable CdS_{0.5}Se_{0.5}/CdSe quantum dot-glass nanosystem. *Nanoscale*, 6(2), 908-915.
- Balbuena, J., Cruz-Yusta, M., y Sánchez, L. (2015). Nanomaterials to combat NO_x pollution. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 15(9), 6373-6385.
- Beauchamp, R. O., Bus, J. S., Popp, J. A., Boreiko, C. J., Andjelkovich, D. A. y Leber, P. (1984). A critical review of the literature on hydrogen sulfide toxicity. *CRC Critical Reviews in Toxicology*, 13(1), 25-97.
- Bhirud, A. P., Sathaye, S. D., Waichal, R. P., Nikam, L. K. y Kale, B. B. (2012). An eco-friendly, highly stable, and efficient nanostructured p-type N-doped ZnO photocatalyst for environmentally benign solar hydrogen production. *Green Chemistry*, 14(10), 2790-2798.
- Chaudhari, N. S., Bhirud, A. P., Sonawane, R. S., Nikam, L. K., Warule, S. S., Rane, V. H. y Kale, B. B. (2011). Ecofriendly hydrogen production from abundant hydrogen sulfide using solar light-driven hierarchical nanostructured ZnIn₂S₄ photocatalyst. *Green Chemistry*, 13(9), 2500-2506.
- De Crisci, A. G., Moniri, A. y Xu, Y. (2019). Hydrogen from hydrogen sulfide: towards a more sustainable hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(3), 1299-1327.
- Faraji, F., Safarik, I., Strausz, O. P., Yildirim, E. y Torres, M. E. (1998). The direct conversion of hydrogen sulfide to hydrogen and sulfur. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(6), 451-456.
- Farrukh, S., Fan, X., Mustafa, K., Hussain, A., Ayoub, M. y Younas, M. (2020). *Nanotechnology and the Generation of Sustainable Hydrogen*. Springer Nature.
- Gulzar, A., Gulzar, A., Ansari, M. B., He, F., Gai, S. y Yang, P. (2020). Carbon dioxide utilization: A paradigm shift with CO₂ economy. *Chemical Engineering Journal Advances*, 3, 100013.
- He, L., Wood, T. E., Wu, B., Dong, Y., Hoch, L. B., Reyes, L. M. y Ozin, G. A. (2016). Spatial separation of charge carriers in In₂O_{3-x}(OH) y nanocrystal superstructures for enhanced gas-phase photocatalytic activity. *ACS nano*, 10(5), 5578-5586.
- Hoch, L. B., O'Brien, P. G., Ali, F. M., Sandhel, A., Perovic, D. D., Mims, C. A. y Ozin, G. A. (2016). Nanostructured indium oxide coated silicon nanowire arrays: a hybrid photothermal/photochemical approach to solar fuels. *ACS Nano*, 10(9), 9017-9025.

- Jia, L., Yu, Y., Li, Z. P., Qin, S. N., Guo, J. R., Zhang, Y. Q. y Jin, Y. (2021). Study on the Hg₀ removal characteristics and synergistic mechanism of iron-based modified biochar doped with multiple metals. *Bioresource Technology*, 332, 125086.
- Ju, W., Bagger, A., Hao, G. P., Varela, A. S., Sinev, I., Bon, V., ... y Strasser, P. (2017). Understanding activity and selectivity of metal-nitrogen-doped carbon catalysts for electrochemical reduction of CO₂. *Nature Communications*, 8(1), 944.
- Kale, B. B., Baeg, J. O., Lee, S. M., Chang, H., Moon, S. J. y Lee, C. W. (2006). CdIn₂S₄ nanotubes and “Marigold” nanostructures: a visible light photocatalyst. *Advanced Functional Materials*, 16(10), 1349-1354.
- Kanade, K. G., Baeg, J. O., Mulik, U. P., Amalnerkar, D. P. y Kale, B. B. (2006). Nano-CdS by polymer-inorganic solid-state reaction: visible light pristine photocatalyst for hydrogen generation. *Materials Research Bulletin*, 41(12), 2219-2225.
- Kim, M. K., Kim, H. J., Lim, H., Kwon, Y. y Jeong, H. M. (2019). Metal-organic framework-mediated strategy for enhanced methane production on copper nanoparticles in electrochemical CO₂ reduction. *Electrochimica Acta*, 306, 28-34.
- Kominami, H., Sumida, K., Yamamoto, K., Kondo, N., Hashimoto, K. y Kera, Y. (2008). Visible-light-induced oxidative removal of nitrogen oxides in air by metal chloride-modified titanium (IV) oxide nanoparticles. *Research on Chemical Intermediates*, 34, 587-601.
- Kwok, K. M., Ong, S. W. D., Chen, L. y Zeng, H. C. (2018). Constrained growth of MoS₂ nanosheets within a mesoporous silica shell and its effects on defect sites and catalyst stability for H₂S decomposition. *ACS Catalysis*, 8(1), 714-724.
- Lee, J. H., Kattel, S., Jiang, Z., Xie, Z., Yao, S., Tackett, B. M. y Chen, J. G. (2019). Tuning the activity and selectivity of electroreduction of CO₂ to synthesis gas using bimetallic catalysts. *Nature Communications*, 10(1), 3724.
- Lee, J. H., Lee, H. J. y Choi, J. W. (2017). Unveiling anomalous CO₂ to N₂ selectivity of graphene oxide. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19(34), 22743-22748.
- Li, W., Guo, R. T., Wang, S. X., Pan, W. G., Chen, Q. L., Li, M. Y. y Liu, S. M. (2016). The enhanced Zn resistance of Mn/TiO₂ catalyst for NH₃-SCR reaction by the modification with Nb. *Fuel Processing Technology*, 154, 235-242.
- Lian, Z., Liu, F., He, H., Shi, X., Mo, J. y Wu, Z. (2014). Manganese-niobium mixed oxide catalyst for the selective catalytic reduction of NO_x with NH₃ at low temperatures. *Chemical engineering journal*, 250, 390-398.
- Liu, H., Li, M., Dao, T. D., Liu, Y., Zhou, W., Liu, L. y Ye, J. (2016). Design of PdAu alloy plasmonic nanoparticles for improved catalytic performance in CO₂ reduction with visible light irradiation. *Nano Energy*, 26, 398-404.
- Ma, Z., Wu, X., Si, Z., Weng, D., Ma, J. y Xu, T. (2015). Impacts of niobium loading on active sites and surface acidity in NbO_x/CeO₂-ZrO₂ NH₃-SCR catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 179, 380-394.
- MacDowell, N., Florin, N., Buchard, A., Hallett, J., Galindo, A., Jackson, G. y Fennell, P. (2010). An overview of CO₂ capture technologies. *Energy & Environmental Science*, 3(11), 1645-1669.

- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A. y Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health*, 14.
- Mateo, D., Albero, J. y Garcia, H. (2019). Titanium-perovskite-supported RuO₂ nanoparticles for photocatalytic CO₂ methanation. *Joule*, 3(8), 1949-1962.
- Mateo, D., Morlanes, N., Maity, P., Shterk, G., Mohammed, O. F. y Gascon, J. (2021). Efficient visible-light driven photothermal conversion of CO₂ to methane by nickel nanoparticles supported on barium titanate. *Advanced Functional Materials*, 31(8), 2008244.
- Moore, F. C. (2009). Climate change and air pollution: exploring synergies and potential for mitigation in industrializing countries. *Sustainability*, 1(1), 43-54.
- Mosrati, J., Atia, H., Eckelt, R., Lund, H., Agostini, G., Bentrup, U. y Mhamdi, M. (2018). Nb-modified Ce/Ti oxide catalyst for the selective catalytic reduction of NO with NH₃ at low temperature. *Catalysts*, 8(5), 175.
- Murayama, T., Chen, J., Hirata, J., Matsumoto, K. y Ueda, W. (2014). Hydrothermal synthesis of octahedra-based layered niobium oxide and its catalytic activity as a solid acid. *Catalysis Science & Technology*, 4(12), 4250-4257.
- Nakajima, F. y Hamada, I. (1996). The state-of-the-art technology of NO_x control. *Catalysis Today*, 29(1-4), 109-115.
- Nathanael, A. J., Kannaiyan, K., Kunhiraman, A. K., Ramakrishna, S. y Kumaravel, V. (2021). Global opportunities and challenges on net-zero CO₂ emissions towards a sustainable future. *Reaction Chemistry & Engineering*, 6(12), 2226-2247.
- O'Brien, P. G., Ghuman, K. K., Jelle, A. A., Sandhel, A., Wood, T. E., Loh, J. Y. y Ozin, G. A. (2018). Enhanced photothermal reduction of gaseous CO₂ over silicon photonic crystal supported ruthenium at ambient temperature. *Energy & Environmental Science*, 11(12), 3443-3451.
- Okazaki, S., Kuroha, H. y Okuyama, T. (1985). Effect of Nb₂O₅ addition on the catalytic activity of FeO_x for reduction of NO_x with NH₃ and O₂. *Chemistry Letters*, 14(1), 45-48.
- Richter, A., Burrows, J. P., Nüß, H., Granier, C. y Niemeier, U. (2005). Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space. *Nature*, 437(7055), 129-132.
- Saleh, T. A. (2022). Nanomaterials and hybrid nanocomposites for CO₂ capture and utilization: environmental and energy sustainability. *RSC Advances*, 12(37), 23869-23888.
- Shelimov, B. N., Tolkachev, N. N., Tkachenko, O. P., Baeva, G. N., Klementiev, K. V., Stakheev, A. Y. y Kazansky, V. B. (2008). Enhancement effect of TiO₂ dispersion over alumina on the photocatalytic removal of NO_x admixtures from O₂-N₂ flow. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 195(1), 81-88.
- Sheng, W., Kattel, S., Yao, S. y Chen, J. G. (2018). Electrochemical Reduction of Aqueous CO₂ to Synthesis Gas Using π Palladium Hydride. *Electrochemical Society Meeting Abstracts* 233(37), 2231-2231. The Electrochemical Society, Inc.
- Signoretto, M., Ghedini, E., Trevisan, V., Bianchi, C. L., Ongaro, M. y Cruciani, G. (2010). TiO₂-MCM-41 for the photocatalytic abatement of NO_x in gas phase. *Applied Catalysis B: Environmental*, 95(1-2), 130-136.

- Suchecki, T. T. y Kumazawa, H. (1994). Application of hydrazine to regeneration of post-absorption solutions in combined SO₂/NO_x removal from flue gases by a complex method. *Sep. Technol.*, 4, 763-770.
- Tang, J. Y., Kong, X. Y., Ng, B. J., Chew, Y. H., Mohamed, A. R. y Chai, S. P. (2019). Midgap-state-mediated two-step photoexcitation in nitrogen defect-modified gC₃N₄ atomic layers for superior photocatalytic CO₂ reduction. *Catalysis Science & Technology*, 9(9), 2335-2343.
- Teramura, K., Iguchi, S., Mizuno, Y., Shishido, T. y Tanaka, T. (2012). Photocatalytic conversion of CO₂ in water over layered double hydroxides. *Angewandte Chemie International Edition*, 51(32), 8008-8011.
- Wang, h. M., Chen, x. Y., Xu, s. Y., Chen, j. D., Zhang, Q. L., Bin, Z. H. A. O. y Ping, N. I. N. G. (2020). Promoting effect of SO₂⁻⁴ functionalization on the performance of Fe₂O₃ catalyst in the selective catalytic reduction of NO_x with NH₃. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 48(5), 584-593.
- Wang, J., Kattel, S., Hawxhurst, C. J., Lee, J. H., Tackett, B. M., Chang, K. y Chen, J. G. (2019). Enhancing activity and reducing cost for electrochemical reduction of CO₂ by supporting palladium on metal carbides. *Angewandte Chemie International Edition*, 58(19), 6271-6275.
- Xie, B., Wong, R. J., Tan, T. H., Higham, M., Gibson, E. K., Decarolis, D. y Amal, R. (2020). Synergistic ultraviolet and visible light photo-activation enables intensified low-temperature methanol synthesis over copper/zinc oxide/alumina. *Nature Communications*, 11(1), 1615.
- Yao, W., Huang, C., Muradov, N. y Ali, T. (2011). A novel Pd-Cr₂O₃/CdS photocatalyst for solar hydrogen production using a regenerable sacrificial donor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(8), 4710-4715.
- Zhang, F., Li, Y. H., Qi, M. Y., Yamada, Y. M., Anpo, M., Tang, Z. R. y Xu, Y. J. (2021). Photothermal catalytic CO₂ reduction over nanomaterials. *Chem Catalysis*, 1(2), 272-297.
- Zhang, P., Yin, S. y Sato, T. (2011). The influence of synthesis method on the properties of iron contained N doped TiO₂ photocatalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 103(3-4), 462-469.
- Zhang, R., Wang, G., Guo, S., Zamora, M. L., Ying, Q., Lin, Y., ... y Wang, Y. (2015). Formation of urban fine particulate matter. *Chemical Reviews*, 115(10), 3803-3855.
- Zhang, W., Wang, L., Wang, K., Khan, M. U., Wang, M., Li, H. y Zeng, J. (2017). Integration of photothermal effect and heat insulation to efficiently reduce reaction temperature of CO₂ hydrogenation. *Small*, 13(7), 1602583.
- Zhang, X., Li, X., Zhang, D., Su, N. Q., Yang, W., Everitt, H. O. y Liu, J. (2017). Product selectivity in plasmonic photocatalysis for carbon dioxide hydrogenation. *Nature Communications*, 8(1), 14542.
- Zhang, X., Tang, Y., Qu, S., Da, J. y Hao, Z. (2015). H₂S-selective catalytic oxidation: catalysts and processes. *ACS catalysis*, 5(2), 1053-1067.

S e m b l a n z a s

Dra. Miriam Sarai Cruz Leal. Obtuvo el grado de doctora en Nanociencias y Micro- nanotecnologías por el Instituto Politécnico Nacional. Es autora principal de diversos productos científicos (artículos y capítulos de libro), imparte clases a nivel licenciatura y posgrado en el área de ingeniería y ciencia de materiales; también ha dirigido tesis de nivel licenciatura y maestría. Actualmente, es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1. Sus líneas de investigación son la síntesis de materiales óxidos metálicos y sus aplicaciones en nanotextiles y sensores de gas. Cuenta con estancias de investigación internacionales en UNIBS (Brescia, Italia) y Universidad de San Luis (Argentina). Su interés en actividades de divulgación científica la han llevado a participar en distintos foros, talleres y conferencias. Ha escrito capítulos de libros de divulgación y su trabajo ha sido reconocido en distintos concursos nacionales e internacionales, entre los que destaca el ensayo titulado “Nanotecnología: explorando un nuevo mundo”, el cual recibió el primer lugar de su categoría en Premio de ensayo 2016, organizado por el IPN; posteriormente publicado en el libro “solo ensayo”. En 2021, obtuvo el premio a mejor cartel de divulgación en la categoría de medio ambiente a nivel Latinoamérica del evento LatinXChem. Su pasatiempo es el diseño gráfico y fotografía científica, uno de sus diseños fue elegido para la contraportada de la revista ChemComm of Royal Society of Chemistry, November 2021, Issue 90.

Dr. Eric Aguilar García. Egresado en la Licenciatura en Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) en el año 2012. En el año 2015 obtuvo el grado de Maestría en Ciencias Químicas y en 2022 el grado de Doctorado en Ciencias Químicas, en la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP. Actualmente, se encuentra realizando una estancia posdoctoral en la Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional, desarrollando materiales a base de sílice funcionalizada con metales de transición para generar propiedades catalíticas y estudiar su aplicación en la descomposición y aprovechamiento de gases contaminantes, y obtener compuestos con valor agregado para industria y sociedad. Cuenta con diferentes publicaciones en revistas indexadas y participaciones de diferentes espacios de divulgación, como ponencias y presentación de pósters en congresos nacionales e internacionales. Además, cuenta con el nombramiento nivel Candidato por parte del Sistema Nacional de Investigadores del CONAHCYT.

Dr. Oscar Goiz Amaro. Es egresado de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Realizó estudios de maestría y doctorado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Se ha desempeñado como docente, coordinador de programa de posgrado y realizado actividades académico-administrativas relacionadas con la investigación y el posgrado en el Instituto Politécnico Nacional. Ha dirigido tesis de nivel superior y posgrado. Su principal línea de investigación es la síntesis de nanomateriales para aplicaciones en sensores de gas conductimétricos. Ha participado en la dirección de proyectos de investigación y en eventos nacionales e internacionales. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1.

Dra. Diana Clemencia Guerrero Araque. Obtuvo el título de Químico de Alimentos en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) en el año 2009, el de Magister en Ingeniería Ambiental en la misma institución en el año 2011 y el de doctora en Ciencias (Química) en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-Iztapalapa) en el año 2017 bajo la asesoría del Dr. Ricardo Gómez Romero. Realizó una estancia postdoctoral en la UNAM en el año 2017 con un proyecto de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la CDMX (SECITI) y en el año 2019 inició una estancia posdoctoral DGAPA en la UNAM en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT). Desde finales del año 2019 se encuentra como Cátedra CONAHCYT de la UAM Iztapalapa. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores Nivel 1, cuenta con 19 artículos, 338 citas y es índice h10 según Google scholar. Las áreas de especialidad son: síntesis de materiales con base en TiO_2 y su evaluación en reacciones fotocatalíticas de oxidación y reducción, obtención de energías limpias (producción de hidrógeno) y conversión de CO_2 , además del estudio de las propiedades semiconductoras y su relación con los procesos de transferencia de carga involucrados en las reacciones fotocatalíticas.

Dra. Itzel Pamela Torres Avila. Es ingeniera biomédica de formación y su doctorado es en Nanociencias y Micro-nanotecnologías, ambos por la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología del Instituto Politécnico Nacional. Su línea de investigación es la caracterización y formación de biomateriales y/o nanomateriales con aplicaciones biomédicas. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1.

Dra. Karla Fabiola Quiroz Estrada. Estudió la licenciatura en Ingeniería Ambiental y la Maestría en Manejo Sostenible de Agroecosistemas en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), obtuvo el grado de Doctora en Nanociencias y Micro-Nanotecnologías por el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Ha realizado dos estancias cortas de investigación en la Universidad Nacional de San Luis, Argentina, y la Universidad “La Sapienza” en Roma, Italia. Tiene una producción de 12 artículos indexados y/o JCR, es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel I y actualmente realiza una estancia posdoctoral en el área de Físicoquímica de Superficies de la UAM-I. Sus investigaciones se enfocan principalmente en la caracterización y uso de nanomateriales, nanoporosidad y captura de gases en cavidades zeolíticas y estructuras de carbono.

Dra. (c). Mónica Esperanza Velásquez Torres. Es Ingeniera Química de formación por la Universidad Industrial de Santander en Colombia, obtuvo su grado de Maestra en Ciencias en Energía y Medio Ambiente en la Universidad Autónoma Metropolitana y actualmente es candidata a doctora del mismo programa. Su línea de investigación principal consiste en la síntesis, caracterización y evaluación de materiales fotocatalíticos para la degradación de contaminantes en el agua.

Dr. Gerardo Francisco Pérez Sánchez. Es profesor-investigador y coordinador del Centro de Investigación en Físicoquímica de Materiales de la BUAP. Sus líneas de investigación se centran en la síntesis de materiales nanoestructurados para aplicaciones en sensores de gas, electrónica flexible y dispositivos optoelectrónicos. Cuenta con amplia experiencia en las técnicas CVD, HFCVD e hidrotermal. Ha participado en la formación de recursos humanos a nivel licenciatura y posgrado. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1.

Dra. Gabriela Vidal García. Estudió licenciatura en Ingeniería Ambiental en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), realizó una maestría en Ciencias Ambientales en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C. (IPICYT), y obtuvo el grado de doctora en Ciencias e Ingeniería de Materiales en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Sus intereses de investigación se centran en el diagnóstico y evaluación de la calidad de agua, aire y suelo, así como los usos de técnicas electroquímicas para síntesis de nanomateriales, determinación y/o cuantificación de contaminantes.

Dr. Hernani Yee Madeira. Doctor en Ciencias Naturales con especialidad en la síntesis y estudio de materiales magnéticos con aplicaciones catalíticas y biotecnológicas. Profesor investigador titular C en la Escuela Superior de Física y Matemáticas del IPN, fundador y responsable del Laboratorio de Espectroscopia Mössbauer y Técnicas Complementarias. Miembro Emérito del Sistema Nacional de Investigadores de CONAHCYT. Su línea de investigación se centra en el desarrollo de materiales, su caracterización por técnicas como DRX, FTIR, TG, Mössbauer y aplicación en áreas como catálisis.
