

# Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

Octubre - Diciembre 2024

ISSN: 2683-2607

No. 135

**Efecto del tostado en la composición  
química de los granos de café**

**¿Cómo funcionan  
los submarinos nucleares?**

**Nanopartículas metálicas  
soportadas como catalizadores**

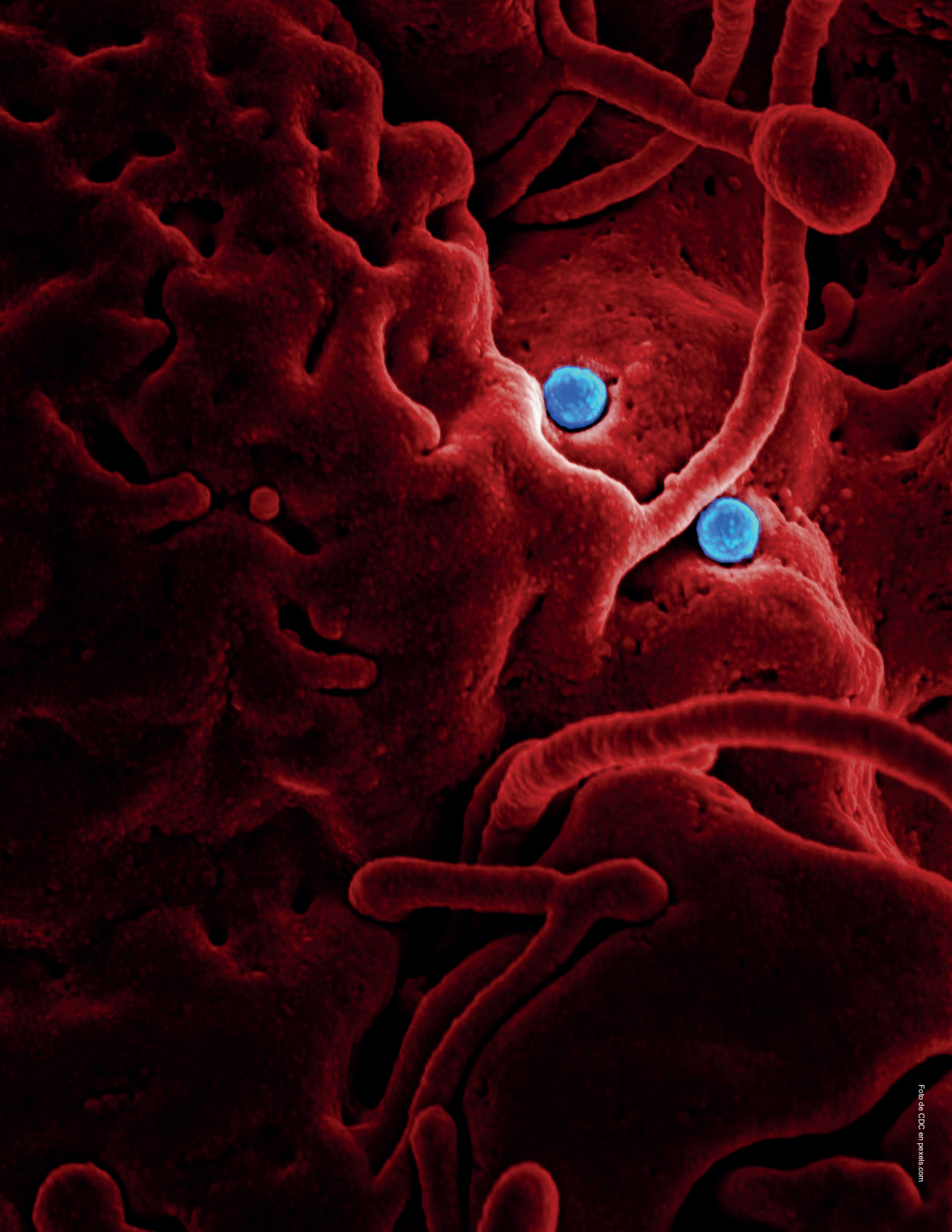
**Ciencia e Ingeniería  
de la Inteligencia Artificial**



UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
METROPOLITANA

Revista de las divisiones de CBI y CBS





# Contenido

## Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

### No. 135 Octubre - Diciembre 2024

		<i>¿Cómo funcionan los submarinos nucleares?</i>	52
Editorial	3	Dra. Alejandría D. Pérez-Valseca Dr. Gilberto Espinosa-Paredes	
<i>Efecto del tostado en la composición química de los granos de café</i>	5	<i>Nanopartículas metálicas soportadas como catalizadores</i>	58
Dr. Zorba Josué Hernández Estrada		Dra. N. Martín	
M. en C. Melissa Rodríguez España		Dra. M. Viniegra	
M. en C. Samuel de Jesús Ángel Juárez		Dr. R. Peralta	
Dra. Mirna L. Suárez-Quiroz		Dr. J. G. Aguilar	
Dr. Oscar González-Rios		Dra. J. Aguilar	
Dra. Claudia Figueroa-Hernández		<i>Un nuevo horizonte tecnológico para los dispositivos en el infrarrojo: integración de antimoniuros, silicio y grafeno</i>	70
<i>Camino a la Sostenibilidad: Innovadoras Estrategias para Combatir la Contaminación por dióxido de carbono CO2</i>	16	M.C. Nayeli Colin Becerril	
Dr. Bertin Anzaldo		Dr. Manolo Ramírez López	
Dr. Pankaj Sharma		Dr. Gerardo Villa Martínez	
Dra. Maribel Arroyo-Carranza		Dra. Patricia Rodríguez Fragoso	
<i>Parásitos y Hospederos: una íntima interacción ecológica que coevoluciona a lo largo de una compleja carrera a través del tiempo</i>	29	Dr. José Luis Herrera Pérez	
Dr. Omar Domínguez-Castanedo		Dr. Julio Mendoza Álvarez	
Dr. J. Jaime Zúñiga-Vega		Dra. Yenny Lucero Casallas Moreno	
M. en C. Jorge Gaspar-Navarro		<i>Ciencia e Ingeniería de la Inteligencia Artificial</i>	79
<i>Temperatura y Precipitación Pluvial en el área urbana y periferia de Morelia Michoacán, México</i>	38	Ing. Matthieu Olague	
Lic. Correa García Armando		Dr. Gustavo Olague	
		<i>Emisiones de CO2 en exceso por consumo de combustible en vehículos ligeros</i>	87
		MBA. Fernando Pérez Márquez	
		M.I. Azucena del Rosario Fraire Vázquez	
		M.G.A. Raúl Enrique Islas Jesús	
		M.S.I.G. Maritza Peralta Fuentes	

**Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería**  
en la WEB

Lea los artículos publicados en  
<https://contactos.izt.uam.mx>



*Rector General*  
Dr. José Antonio de los Reyes Heredia  
*Secretaria General*  
Dra. Norma Rondero López

### **UNIDAD IZTAPALAPA**

*Rectora*  
Dra. Verónica Medina Bañuelos  
*Secretario*  
Dr. Javier Rodríguez Lagunas  
*Director de la División de Ciencias  
Básicas e Ingeniería*  
Dr. Román Linares Romero  
*Director de la División de Ciencias  
Biológicas y de la Salud*  
Dr. José Luis Gómez Olivares

### **Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería:**

Consejo Editorial:  
Dra. Verónica Medina Bañuelos  
Dr. Javier Rodríguez Lagunas  
Dr. Román Linares Romero  
Dr. José Luis Gómez Olivares  
*UAM- Iztapalapa*  
*Editora en Jefe:*  
M. C. Alma Edith Martínez Licona  
*Asistente Editorial:*  
Lic. Paula López Andrés  
*Comité Editorial por CBS:*  
Dra. Edith Arenas Ríos, Dra. Laura Jose-  
fina Pérez Flores, Dr. Pedro Luis Valverde  
Padilla  
*Por CBI:*  
Dr. Hugo Ávila Paredes  
*Por la Universidad Iberoamericana:*  
Mtro. Adolfo G. Fink Pastrana

### **CONTACTOS, REVISTA DE EDUCACIÓN EN CIENCIAS E INGENIERÍA.**

3ª Época, No. 135, Octubre-Diciembre 2024,  
es una publicación trimestral de la Univer-  
sidad Autónoma Metropolitana a través de  
la Unidad Iztapalapa, División de Ciencias  
Básicas e Ingeniería y División de Ciencias  
Biológicas y de la Salud. Prolongación Ca-  
nal de Miramontes 3855, Col. Ex-Hacienda  
San Juan de Dios, Alcaldía Tlalpan, C.P.  
14387, México, Ciudad de México y Av. Fe-  
rrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Le-  
yes de Reforma 1a Sección, Iztapalapa, Cd.  
de México. C.P. 09310, Edificio T144, Tel.  
5804 – 4600. Ext. 1144. Página electrónica  
de la revista: <https://contactos.izt.uam.mx/>  
y dirección electrónica: [cts@xanum.uam.mx](mailto:cts@xanum.uam.mx)  
Editora responsable MC Alma E. Martínez  
Licona. Certificado de Reserva de Derechos  
al Uso Exclusivo de Título No. 04-2023-  
061914482700-102, ISSN 2683-2607, am-  
bos otorgados por el Instituto Nacional del  
Derecho de Autor. Responsable de la última  
actualización de este número, Mtra. Alma  
E. Martínez Licona; Unidad Iztapalapa, Di-  
visión de CBI y CBS; fecha de última modi-  
ficación 23 de Enero de 2025. Tamaño del  
archivo 14.4 MB.

Las opiniones expresadas por los auto-  
res no necesariamente reflejan la postura  
del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la re-  
producción total o parcial de los conteni-  
dos e imágenes de la publicación sin previa  
autorización de la Universidad Autónoma  
Metropolitana.

Fecha de Publicación:  
Octubre - Diciembre 2024.

Los artículos publicados en **Contactos, Revista de Educación en Ciencias  
e Ingeniería** son sometidos a arbitraje; para ello se requiere enviar  
el trabajo en Word a <https://contactos.izt.uam.mx/>  
**Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería,**  
UAM – Iztapalapa, T144, Tel. 5804-4600. Ext. 1144  
Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186. C.P. 09310  
e-mail [cts@xanum.uam.mx](mailto:cts@xanum.uam.mx)



## Editorial

Hemos llegado al final del año 2024, un año lleno de festejos por el 50 Aniversario de nuestra querida Universidad Autónoma Metropolitana. Durante este año, la revista Contactos participó con 5 números especiales para unirnos a la celebración, de los cuales, cuatro fueron publicados y el último número se publicará en febrero del 2025.

Agradecemos a los siguientes Departamentos por su valioso trabajo, cada uno colaboró con un número especial: Departamento de Química, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería de Procesos e Hidráulica y Física. Todos de la División de CBI de la UAM Iztapalapa y finalmente al CI3M por su colaboración en el último número especial.

Además de los 4 números especiales mencionados, se publicaron los 4 números anuales, teniendo una producción de 8 números en todo el 2024. Esperamos que los artículos de temas muy variados publicados durante todo el 2024 hayan sido del interés de nuestros amables lectores, publicando este último número del año con artículos de CBI y CBS.

Esperando que este número sea de su agrado, agradecemos por seguir apoyando a la revista tanto autores como lectores y árbitros, el equipo de la Revista Contactos les desea un feliz fin de año. Seguiremos trabajando para mejorar cada edición de cada número de nuestra querida Revista Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería.

Atentamente  
*MC Alma E. Martínez Licona*  
**Editora en Jefe, Revista Contactos**



## Información para autores

**Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería**, Revista dirigida a profesores y a estudiantes de estas disciplinas.

Está registrada en el índice de revistas de divulgación de Conacyt, así como en Latindex, Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.

Para publicar, los trabajos deberán ser originales y accesibles a un público amplio con formación media superior o universitaria pero no especializada; los temas deberán presentarse en forma clara. Cada colaboración debe incluir figuras, diagramas, ilustraciones, fotografías, etc. (otorgando el crédito correspondiente en caso de no ser original), que hagan más accesible la presentación.

**Las secciones que la constituyen son:**

**1. Divulgación.** Artículos que presentan temas científicos con enfoques novedosos y accesibles (15 cuartillas).

**2. Educación científica.** Enfoques originales en la enseñanza de temas particulares (15 cuartillas).

**3. Artículos especializados.** Reportes breves de investigación, relacionados con una problemática concreta (15 cuartillas).

**4. Crónicas.** Historia y desarrollo de conceptos científicos, así como teorías alternativas (15 cuartillas).

**5. Divertimentos.** Juegos y acertijos intelectuales (5 cuartillas).

**6. Noticias breves.** Información de actualidad en el mundo de la ciencia (4 cuartillas).

**7. Los laureles de olivo.** Los absurdos de la vida cotidiana y académica (4 cuartillas).

En todos los casos se debe incluir los nombres completos de los autores con su adscripción, dirección, teléfono y dirección de correo electrónico.

### Normas

Las colaboraciones a las secciones 1 a 4 deberán ajustarse a las siguientes normas:

1. Resumen escrito en español e inglés.
2. 4 palabras clave en español en inglés.
3. Cuando se incluya una abreviatura debe explicarse por una sola vez en la forma siguiente: Organización de los Estados Americanos (OEA). . .
4. Cuando se utilice un nombre técnico o una palabra característica de una disciplina científica deberá aclararse su significado de la manera más sencilla posible.

5. Las citas textuales deberán ir de acuerdo al siguiente ejemplo: En cuanto la publicación del placebo se asevera que “el efecto placebo desapareció cuando los comportamientos se estudiaron en esta forma” (Núñez, 1982, p.126).

6. Las referencias (no más de 10) se marcarán de acuerdo al siguiente ejemplo: Sin embargo, ese no es el punto de vista de la Escuela de Copenhague (Heisenberg, 1958), que insiste en. . .

7. Al final del artículo se citarán las referencias por orden alfabético de autores. Pueden añadirse lecturas recomendadas (no más de 5).

8. Cada referencia a un artículo debe justarse al siguiente formato: Szabadváry, F. y Oesper, E., Development of the pH concept, *J. Chem. Educ.*, 41 [2], pp.105 -107, 1964.

9. Cada referencia a un libro se ajustará al siguiente formato: Heisenberg, W., *Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science*, Harper Torchbook, Nueva York, pp.44-58, 1958. 10. Para páginas electrónicas: dirección (fecha de acceso).

11. Los títulos de reportes, memorias, etcétera, deben ir subrayados o en itálicas.

### Envío y características del artículo

El envío del artículo deberá ser en archivo electrónico, en Word, tipo de letra Times New Roman, tamaño 12 con interlineado sencillo y uso de editor de ecuaciones.

En el caso de ilustraciones por computadora (BMP, JPG, TIFF, etc.) envíelos en archivos por separado.

El material es recibido en:

### Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería.

UAM – Iztapalapa, T144,

Información: cts@xanum.uam.mx,

Tel. 5804-4600. Ext. 1144.

Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186.

C.P. 09310

### Arbitraje

El Comité utiliza un sistema de arbitraje anónimo que requiere un mes. Se entiende que los autores no han enviado su artículo a otra revista y que dispondrán de un plazo máximo de un mes para incorporar las observaciones de los árbitros.

La decisión final de publicar un artículo es responsabilidad exclusiva del Comité Editorial.





# **Efecto del tostado en la composición química de los granos de café**

**Dr. Zorba Josué Hernández Estrada**  
**M. en C. Melissa Rodríguez España**  
**M. en C. Samuel de Jesús Ángel Juárez**  
**Dra. Mirna L. Suárez-Quiroz**  
**Dr. Oscar González-Rios**

*Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz,  
Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos*

**Dra. Claudia Figueroa-Hernández**  
*CONACYT—Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico  
de Veracruz, Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos*



**Abstract**

The coffee drink is one of the most popular beverages worldwide due to its aroma and flavor. This infusion is prepared by extracting hot water—soluble compounds from the roasted and ground coffee beans. Of the 100 species of the *Coffea* genus, only three are commercialized *Coffea arabica* L., *C. canephora*, and *C. liberica*, the *Coffea arabica* L. the most commercialized. To obtain the flavor and aroma compounds characteristic of the coffee drink, the coffee cherry must be subjected to postharvest operations, which allow its chemical composition to be transformed. The main processes involved in this complex group of chemical transformations are fermentation, drying, and roasting. This review aims to provide an overview of the main changes in the chemical composition of arabica and robusta coffee during the benefit and roasting, as well as its possible effects on its quality attributes.

**Keywords:** Coffee, *Coffea arabica*, *Coffea robusta*, Maillard reactions, roasting

**Resumen**

La bebida de café es una de las bebidas más populares a nivel mundial debido a su aroma y sabor característico. Esta infusión se prepara mediante la extracción de compuestos solubles en agua caliente a partir de los granos tostados y molidos de la cereza del café. Existen 100 especies del género *Coffea*, sin embargo, solo tres especies son comercializadas: *Coffea arabica* L., *C. canephora* y *C. liberica*, siendo la especie *C. arabica* L. la más comercializada. Para que se formen los compuestos de sabor y aroma característicos de la bebida del café se requiere que la cereza del cafeto sea sometida a una serie de operaciones postcosecha que permitan transformar su composición química. Los

principales procesos implicados en este complejo de transformaciones químicas son la fermentación, el secado y el tostado. El objetivo de esta revisión es brindar un panorama sobre los principales cambios en la composición química del café arábica y robusta durante el beneficio y el tostado, así como su posible efecto en sus atributos de calidad.

**Palabras claves:** Café, *Coffea arabica*, *Coffea robusta*, reacciones de Maillard, tostado

**1. La importancia del cultivo de café**

Se entiende por café a la bebida preparada mediante la extracción de la materia soluble con agua caliente a partir de los granos tostados y molidos procedentes del fruto de la planta tropical cafeto (*Coffea*) (Desrosier, 1987). Esta bebida es una de las más consumidas a nivel mundial y es el segundo producto más comercializado después del petróleo. De acuerdo con lo reportado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica, se estima una producción mundial de café durante el ciclo 2022/2023 de 171 millones de sacos de 60 kg. La popularidad de la bebida se debe a sus atributos sensoriales, propiedades estimulantes de la cafeína y otros efectos deseables asociados con su consumo, como su potencial antioxidante (De Melo Pereira *et al.*, 2019, Kulapichitr *et al.*, 2019).

El cafeto es una planta perteneciente a la familia de las Rubiáceas y al género *Coffea*. Es de origen africano y está conformado por más de 100 especies, sin embargo, solo una pequeña parte son utilizadas para la comercialización, siendo las tres más importantes: *Coffea arabica* L., *C. canephora* y *C. liberica*. Actualmente solo se cultivan Arábica (53 % del volumen total de producción) y Robusta (47 % del volumen total de producción),



Café Arábica	Café Robusta
Grano forma alargada	Grano forma redondeada
Calidad superior en taza	Menor tamaño de grano
Atributos sensoriales más apreciados	Más económico
Menor contenido de sólidos totales	Mayor contenido de sólidos solubles
Más susceptible a plagas y enfermedades	Más resistente a plagas y enfermedades
Menos concentración de cafeína (1.2 — 1.5 %)	Mayor concentración de cafeína (2.2 — 2.7 %)

Tabla 1. Principales características de los granos de café Arábica y Robusta (Adaptado de Alves et al., 2017)

esto debido a las principales características que presentan (Tabla 1).

## 2. El fruto del café

El fruto del cafeto es denominado cereza. Las cerezas de café son de forma redonda, suaves, levemente agrios, con una corteza lisa y un intenso perfume. Cuando la cereza de café ha alcanzado su madurez, presenta una coloración roja o amarilla. Cada una de las cerezas posee una piel exterior (exocarpio) que envuelve a una película plateada o silver skin) y estas membranas envuelven las dos semillas (endospermo) de café (Figura 1). Las semillas de café, conocidas como café verde o café oro en ciertos países, son sometidas a un proceso de tostado para lograr la elaboración de la infusión que todos conocemos.

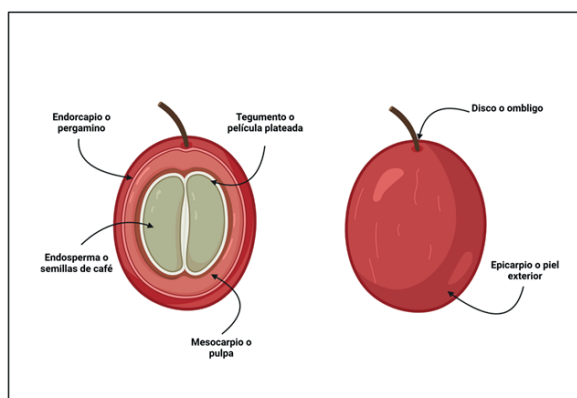


Figura 1. Partes de la cereza de café

## 3. Composición química del café

Los granos de café presentan una composición química rica en aminoácidos y otros compuestos nitrogenados, polisacáridos, lípidos, ácidos (clorogénico, cafeico, ferúlico, gálico, láctico, protocatéquico), compuestos fenólicos (catequinas y antocianinas), melanoidinas, cafeína, vitaminas y minerales. En la Tabla 2 se muestra la distribución de la composición química en la cereza, pulpa y el mucilago del café, la cual es afectada por la variedad, región geográfica, clima y labores de cultivo, cambia por la variedad, región geográfica, clima.

El grano de café es la parte del fruto de café que se utiliza para la preparación de las bebidas de café debido a sus compuestos volátiles que resultan en precursores de los aromas característicos de la bebida, y los cuales se desarrollan durante el tostado.

## 4. Operaciones postcosecha del café

Las operaciones postcosecha en la cadena del café, las cuales también se conocen como beneficio, tienen como objetivo la remoción de los componentes que rodean al grano para que estos puedan ser secados hasta alcanzar un contenido de humedad menor al 12 %, lo cual permita transportar y almacenar el grano sin riesgo al deterioro microbiano. El beneficio comienza a partir de la recolección

Compuestos (% de peso seco)	Parte del café		
	Cereza	Pulpa	Mucilago
Peso Seco	81	29	5
Proteína	7.5	10	8.9
Fibra cruda	19	21	18
Cenizas	5 — 6	8	0.7
Extracto crudo de nitrógeno	1.2 — 8	44	35.8
Taninos	7.7	1.8 — 8.6	0
Sustancias pépticas totales	0.88	6.5	35.8
Azúcares no reductores	8	2	20
Azúcares reductores	0.05 — 0.20	12.4	30
Cafeína	0.73	1.3	0
Ácidos clorogénicos	6 — 7	2.6	—
Celulosa	19.4	27.7	19.4

Tabla 2. Composición química de las cerezas pulpa y mucilago de café antes del beneficiado (Schwan y Fleet, 2015)

de las cerezas maduras de café. Estas prácticas varían de acuerdo con el país, el tipo de cultivo y la especie de café, y permiten transformar a la cereza de café en un producto seco y listo para el proceso de trilla. Durante estas operaciones suceden transformaciones fisicoquímicas en la pulpa, el mucilago y la semilla del café que tienen un efecto en la calidad final de la bebida.

Estas operaciones postcosecha se dividen en dos principales vías: la vía seca y la vía húmeda.

#### 4.1 Vía o beneficio seco

La vía seca, también conocido como beneficio seco, representa la forma tradicional del procesamiento de café y consiste en secar toda la cereza (pulpa, pergamino y grano) hasta alcanzar una humedad del 12 — 14 %, a través de la limpieza, secado y descascarillado. Como se muestra en la Figura 2, el proceso de esta vía consiste en recolectar las cerezas maduras de la planta para posteriormente secarlas hasta por 20 días de manera natural (sol) o por secado mecánico. Posteriormente se realiza el desprendi-

miento de la cascara del grano y mucilago para obtener el café pergamino.

El café obtenido mediante esta vía suele ser amarillo o café y produce una bebida menos ácida y con mayor cuerpo que la producida por la vía húmeda. Este procesamiento es usado en la mayoría de los cafés arábigos cultivados en Brasil, Etiopía y Yemen y para todos los cafés Robusta del mundo. Dentro de los efectos que tiene este método sobre los granos es la impregnación de la semilla con los azúcares y otros compuestos presentes en el mucilago del café, lo cual provoca que se tenga una bebida final con los sabores característicos de los cafés beneficiados por esta vía.

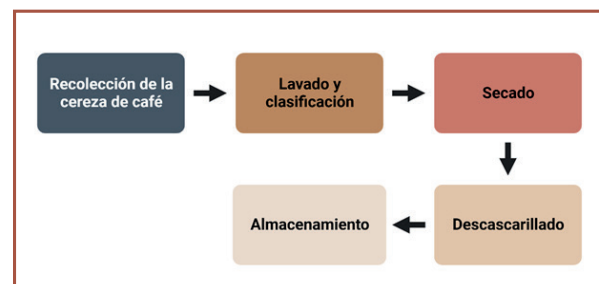


Figura 2. Operaciones básicas del beneficio seco del café



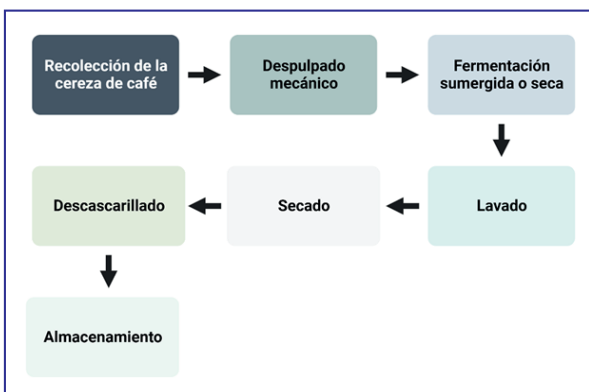


Figura 3. Operaciones básicas del beneficio húmedo del café

#### 4.2 Vía o Beneficio húmedo

La vía o beneficio húmedo utiliza equipos específicos y una gran cantidad de agua. Este método bien realizado asegura que las cualidades intrínsecas de los granos de café se conserven mejor, produciendo un café verde más homogéneo. El café producido por este método se considera de mejor calidad y se comercializa con un precio mayor. Este método es utilizado en la gran mayoría de los cafés Arábicas con excepción de los producidos en Brasil, Yemen y Etiopía, así como en un pequeño porcentaje de café robusta.

Las operaciones básicas del procesamiento húmedo del café se muestran en la Figura 3. El lavado de las cerezas se realiza en tanques de agua. Una vez que las cerezas hayan sido clasificadas y lavadas, se retira la pulpa de la cereza. Los granos despulpados son fermentados por la microbiota autóctona del grano de café, La eliminación del mucílago se realiza entre las 24 y 36 h de fermentación, dependiendo de la temperatura, grosor de la capa del mucílago y concentración microbiana. El final de la fermentación se da cuando los granos pierden su textura viscosa y adquieren una textura más áspera. Finalmente,

cuando termina este proceso, el café es lavado con agua en tanques o en máquinas. El café en esta etapa tiene aproximadamente un contenido de humedad entre el 55 — 57 %. Posteriormente, para reducir su humedad a un valor máximo del 12.5 %, el café pergamino es secado al sol, en secadores o por una combinación de los dos. Este último paso resulta de gran importancia porque de él depende la calidad del producto final.

Después del secado, el café procesado en húmedo, o café pergamino, como es comúnmente conocido, se almacena y permanece en esta forma hasta su exportación (Batista *et al.*, 2016).

Una vez terminados los procesos de beneficio en ambas vías, el café se somete a un nuevo proceso denominado “trilla de café”, con el objetivo de obtener el café almendra o café verde. Una vez trillado, el grano verde se selecciona y clasifica cuidadosamente, teniendo en cuenta su tamaño, peso, color y apariencia física (defectos). Este café verde o almendra es el insumo para la elaboración del café tostado, del café soluble y de los extractos de café, y se caracteriza por su color verde, olor característico de café fresco y humedad promedio del 10 — 12 %. El almacenamiento de la cereza en bolsas, montones o silos, no debe de ser mayor a ocho horas, ya que se puede producir un proceso de fermentación espontánea no controlada que tiene un impacto negativo en la calidad final del café (Schwan y Fleet, 2015).

#### 5. Composición química del café verde

La calidad y la composición química de los granos de café verde son afectados por muchos factores, entre los que destacan la composición del suelo, la fertilización, la

Compuesto	Concentración <sup>a</sup> (g/100 g)	
	<i>Coffea arabica</i>	<i>Coffea robusta</i>
Carbohidratos solubles	9 — 2.5	6 — 11.5
Sacarosa	6.0 — 9.0	3 — 7
Azúcares reductores	0.1	0.4
Polisacáridos insolubles	3 — 4	3 — 4
Hemicelulosas	5 — 10	3 — 4
Celulosa	41 — 43	32 — 40
Proteínas/péptidos	10 — 11	11 — 15
Cafeína	0.8 — 1.4	1.7 — 4.0
Trigonelina	0.6 — 1.2	0.3 — 0.9
Triacilglicéridos	15 — 17	8 — 12
Diterpenos (libres o esterificados)	0.5 — 1.2	0.2 — 0.8
Minerales	3 — 4.2	4.4 — 4.5
Ácidos clorogénicos	6.7 — 9.2	7.1 — 12.1
Ácido 5-O—afeilquinico	3.0 — 5.6	4.4 — 6.6

<sup>a</sup> Base seca, contenido de agua en el café verde 7 — 13 %

Tabla 3. Composición química del café verde de los granos de café Arábica y Robusta (g / 100 g)

altitud y el clima y los métodos de procesamiento utilizados.

A continuación, en la Tabla 3, se muestra la composición química del café verde de los granos de café Arábica y Robusta (Cid y Peña, 2016).

Los granos de café verde tienen un sabor mínimo, sin embargo, durante el tostado se desarrollan los compuestos característicos del aroma de café debido a reacciones químicas complejas que suceden en los granos. Para que se desarrollen los atributos aromáticos que se requieren, los granos de café verde son tostados empleando diferentes perfiles de tostado (combinaciones tiempo—temperatura).

## 6. Tostado del café

El tostado de café implica la transformación de los granos de café verde mediante la aplicación de calor durante cortos periodos de tiempo. Esto implica una serie de transformaciones fisicoquímicas que

permiten desarrollar el sabor y el aroma característicos de la bebida de café. Generalmente, el tostado de los granos de café se realiza en los países consumidores debido a sus características de friabilidad y sabor de los granos tostados, ya que estos no resisten los movimientos implicados en el comercio internacional (Alves *et al.*, 2017).

Los granos de café suelen ser almacenados una vez que se ha confirmado su calidad hasta que se realice el proceso de tostado. Para realizar el tostado del café se pueden emplear diferentes sistemas basados en conceptos térmicos, operacionales o mecánicos, sin embargo, en la actualidad es ampliamente utilizada la tecnología de lecho fluidizado para lograr este objetivo.

Durante el tostado, los granos son calentados a 180 — 250 °C, dependiendo de la técnica de tostado utilizado y del grado de tostado deseado (claro, medio u oscuro). Existen tres fases principales durante el tostado: el secado, pirólisis y enfriamiento.



Durante la fase de secado, la mayor parte del agua libre se evapora manteniendo la temperatura del grano a 100 ° C. Posteriormente se aumenta la temperatura para dar inicio a la segunda fase. Cuando se alcanza una temperatura de aproximadamente 150 °C, comienza a producirse una liberación de productos volátiles (agua, CO y CO<sub>2</sub>), lo que resulta en un aumento del 50 — 80 % en el volumen de los granos. Y finalmente, cuando se alcanzan temperaturas entre los 170 — 200 °C, las reacciones pirolíticas modifican drásticamente la composición química del grano mediante la formación de cientos de sustancias que le dan al café su aroma y sabor característicos. Al término del tostado, los granos se revientan debido al aumento de la presión interna, indicando que el tostado se debe detenerse para dejarlos enfriar.

Como se mencionó anteriormente, al tostar el café, los granos sufren modificaciones químicas, esto debido a que durante el tostado están involucradas una serie de transformaciones fisicoquímicas (formación y/o degradación de una gran cantidad de compuestos) que modifican su composición inicial y originan el aroma y el sabor característicos del café. Por ejemplo, uno de los primeros cambios sucede cuando los granos alcanzan una temperatura por encima de los 50 °C, las proteínas en las células del tejido se desnaturalizan. Además de estos cambios químicos, también existen modificaciones en los parámetros físicos como el color (coloración marrón — canela), pérdida de peso (11 — 20 %) y pérdida de la gravedad específica (1.2 — 0.6 debido al aumento de volumen).

Existe también un proceso de tostado en el cual se agrega hasta un 15 % de azúcar al café, generalmente de la especie robusta.

Esta técnica de tostado se le conoce como torrefacción y se utiliza en varios países del sur de Europa y América del Sur, en los cuales algunos segmentos de su población prefieren los cafés con un color marrón oscuro, un aroma intenso y un sabor fuerte con tendencia a la amargura. Este tipo de proceso de tostado se usó inicialmente para enmascarar atributos sensoriales negativos en los cafés robusta. En la actualidad, el café torrefacto se suele mezclar con el café tostado convencional (robusta) para uso comercial.

Para producir granos tostados con alta calidad, mantener el grado de tostado es probablemente el factor más importante. Mientras más tiempo permanezcan los granos de café en el tostador o mayor sea la temperatura de tostado, más oscuros serán los granos de café que se obtengan (Figura 4).

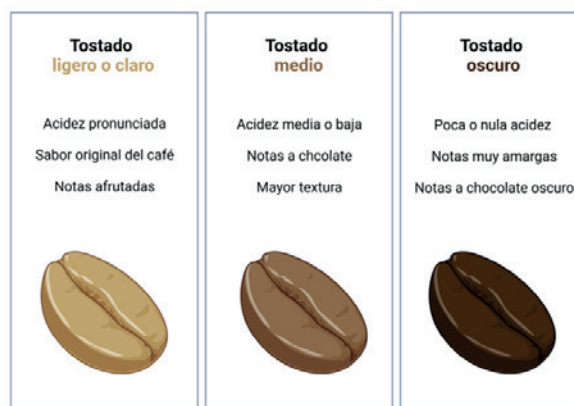


Figura 4. Tipos de tostado y su influencia en el sabor del café

El grado de tostado de un café puede ser medido a través del color del grano a simple vista, con un colorímetro, o por la pérdida de peso en los granos después del tostado. En la tabla 4. Se muestran los principales grados de tostado del café, así como sus porcentajes promedio de pérdida de peso y el valor L (claridad en el espacio de color CIELAB), en donde a menor valor de L mayor será el

Grado de tostado	Nombre del tostado	Valor de $L^a$	Pérdida de peso
Grado de tostado ligero	Tostado ligero	30.2	10.0 — 14.0
	Tostado canela	27.3	
	Tostado medio	24.2	
Grado de tostado medio	Tostado alto	21.5	14.0 — 17.0
	Tostado city	18.5	
	Tostado full city	16.8	
Grado de tostado oscuro	Tostado francés	15.5	17.0 — 21.0
	Tostado italiano	14.2	

<sup>a</sup> El valor de  $L$  varía entre 0 (negro) a 100 (blanco)

Tabla 4. Pérdida de peso y valor  $L$  encontrados en los diferentes grados de café tostado (Wei y Tanokura, 2015)

grado de tostado (Wei y Tanokura, 2015). Estos grados o niveles de tostado se adaptan a los gustos y preferencias de diferentes consumidores y mercados. Es así como en ciertos mercados como en Norte América y los países escandinavos prefieren niveles de tostados bajos o medios, y en otros mercados como en la cuenca del Mediterráneo prefieren cafés con tostados altos en los que se tienen una menor presencia de notas ácidas y florales de origen y más cuerpo.

## 6. Cambios químicos durante el proceso de tostado

Durante el proceso de tostado están involu-

crados una serie de cambios en la composición química de los granos de café, algunos son degradados o modificados, y esto resulta en el desarrollo del color, aroma y sabor característicos del café. Estas transformaciones han sido ampliamente estudiadas, sin embargo, todavía quedan muchas transformaciones sin elucidarse. En la Tabla 5, se muestran los principales compuestos encontrados en el café tostado (Arábica y Robusta). El tostado conduce a cambios profundos en la composición química del café, con una disminución simultánea de las sustancias que naturalmente se encuentran en el café verde, así como también en la genera-

Compuesto	Concentración <sup>a</sup> (g/100g)	
	<i>Coffea arabica</i>	<i>Coffee robusta</i>
Sacarosa	Trazas — 4.2	Trazas — 1.6
Azúcares reductores	0.3	0.3
Polisacáridos	31 — 33	37
Proteínas/péptidos	7.5 — 10	7.5 — 10
Cafeína	1.1 — 1.3	2.4 — 2.5
Triacilglicéridos	17	11
Diterpenos (libres o esterificados)	0.9	0.2
Melanoidinas	25	25

<sup>a</sup> Base seca, contenido de agua en el café tostado 1 — 5%

Tabla 5. Composición química del café verde de las especies Arábica y Robusta (g / 100g)



ción de muchos otros compuestos derivados resultantes de las reacciones de Maillard, la caramelización de carbohidratos y la pirólisis de compuestos orgánicos. Algunos de estos compuestos, que se producen durante el tostado, le pueden conferir sus propiedades biológicas al café, sin embargo, también pueden generarse compuestos cancerígenos potenciales, como la acrilamida y el furano (Alves *et al.*, 2017).

La mayoría de los carbohidratos presentes, como la celulosa y los polisacáridos de manosa, galactosa y arabinosa, son insolubles, no obstante, durante el tostado algunos de ellos se degradan a carbohidratos de bajo peso molecular, que son solubles (Alves *et al.*, 2017). La sacarosa, que es el carbohidrato más abundante en los granos de café verde, se degrada en una etapa temprana durante el tostado y resulta en un precursor de compuestos aromáticos (ej. ácidos carboxílicos, furanos y aldehídos) los cuales tienen un efecto en su sabor. Por otro lado, se ha observado que las concentraciones de ácido cítrico y málico disminuyen durante el tostado mientras que las concentraciones de ácido láctico, acético y fórmico aumentan durante el proceso de tostado. Mediante reacciones modelo, se ha confirmado que la sacarosa es la fuente principal de los ácidos alifáticos como fórmico, acético, glicólico y láctico (Wei y Tanokura, 2015).

Durante el proceso de calentamiento del café, los compuestos fenólicos experimentan grandes cambios debido a su inestabilidad térmica. También el contenido de los ácidos clorogénicos disminuye durante el tostado. Estos ácidos tienen un gran impacto en los atributos de calidad del café tostado y está directamente relacionada con el desarrollo del sabor.

Por otro lado, las reacciones de Maillard implican la condensación del grupo carbonilo de los azúcares reductores con el grupo amino de aminoácidos y proteínas. Estas reacciones generan una gran cantidad de productos con diferentes composiciones químicas, comúnmente conocidos como productos de la reacción de Maillard. Los productos finales poliméricos de color marrón de estas reacciones se llaman melanoidinas y son el resultado de las ciclizaciones, deshidrataciones, reordenamientos, isomerizaciones y condensaciones de otros productos. Las melanoidinas son uno de los componentes principales en el café tostado, y representan hasta el 25 % en base seca. Estos compuestos presentan diferente composición química, y por lo tanto tienen diferentes propiedades pudiendo actuar como sitios de unión de nutrientes o contaminantes, antioxidantes o prooxidantes, y mutagénicos o anti-mutagénicos.

Las reacciones de Maillard además del desarrollo de color desempeñan un papel clave en la producción de compuestos aromáticos como las pirazinas, aldehídos, cetonas, piridinas, oxazoles, tiazoles y tiofenos. En ese aspecto la adición de azúcar al final del proceso de tostado de torrefacción podría intensificar estas reacciones. Las proteínas presentes en el café verde son sometidas a cambios extensos cuando se calienta en presencia de carbohidratos. Asimismo, existen cambios composicionales en el perfil de aminoácidos antes y después del tostado. La concentración de los aminoácidos arginina, ácido aspártico, cisteína, histidina, lisina, serina, treonina y la metionina, disminuyen en el café tostado debido a que son muy reactivos mientras que la alanina, ácido glutámico y la leucina, aumentan su concentración debido a su mayor estabilidad. La degradación de los aminoácidos

azufrados produce mercaptanos, tiofenos, tiazoles, pirroles, piridinas, entre otros.

El contenido de cafeína solo disminuye ligeramente durante el tostado debido a su termoestabilidad. En contraste, la trigonelina, un derivado de la piridina que está presente en el café verde hasta 1.2 %, se degrada hasta un 50 — 80 %, de forma proporcional a la temperatura empleada en el tostado. La trigonelina contribuye de forma indirecta en la generación de sabores deseables durante el tostado del café como los furanos, pirazinas, alquilpiridinas y pirroles (Wei y Tanokura, 2015).

La fracción lipídica también parece mostrar estabilidad durante el tostado y solo sufre pequeños cambios. El ácido linoleico es el ácido graso predominante, seguido por el ácido palmítico. Los principales compuestos en los granos de café tostados (aceite de café) son los triacilglicéridos (78.8 %) y los ésteres de diterpeno (15 %). Los diterpenos más representativos son cafestol, 16-O-etilcafestol y kahweol. El cafestol y el kahweol son parcialmente degradados durante el proceso de tostado, lo cual resulta de gran importancia debido a que se les considera responsables del aumento en los niveles de colesterol total y LDL observados en algunas poblaciones.

El aroma del café tostado es muy complejo, ya que está compuesto por una gran cantidad de compuestos volátiles con diferentes cualidades de olor: algunos agradables, pero muchos otros probablemente por debajo de su umbral de detección. La concentración, la proporción y los efectos sinérgicos y antagónicos entre los compuestos volátiles influyen en la calidad final del aroma.

La composición volátil del café tostado depende de muchos factores, que incluyen la

variedad / especie de café, las condiciones de cultivo y cosecha, el almacenamiento antes del tostado, el grado de tostado y el tipo de máquina tostadora. La formación de compuestos volátiles depende de la estabilidad de sus precursores y la ubicación dentro de la semilla. Hasta el momento, se han identificado más de 1000 compuestos con una amplia variedad de grupos funcionales después de tostarlos en diferentes tipos de café. Alguna de las clases de compuestos volátiles que se encuentran en el café tostado son: furanos, piranos, pirazinas, pirroles, aldehídos, cetonas, fenólicos, hidrocarburos, alcoholes, ácidos, ésteres, lactonas, tiofenos, oxazoles, tiazoles, piridinas, aminas y diversos compuestos de azufre y nitrógeno. No todos los volátiles en el café son aromáticos, y su contribución al sabor no suele estar directamente relacionada con su abundancia.


En conclusión, se puede decir que el aroma complejo del café es formado durante el tostado por la pirólisis de compuestos solubles en agua (aminoácidos, azúcares, trigonelina). Así mismo, por la producción de precursores de aromas obtenidos a partir de las rutas como: reacciones de Maillard, degradación de Strecker, degradación y formación de pirazinas y oxazoles, y la degradación de la trigonelina, ácidos fenólicos, azúcares y lípidos. De forma general, los carbohidratos producen furanos, aldehídos, cetonas y fenoles, las proteínas péptidos y aminoácidos producen cetonas, pirroles y fenoles y pirazinas mientras los lípidos producen pequeñas cantidades de aldehídos y cetonas, debido a su estabilidad (Alves *et al.*, 2017).

## Referencias

1. Alves, C., Rodrigues, F., Nunes, M.A., Vinha, Beatriz, M. y Oliveira P.P., *State of*



- the art in coffee processing by-products*. En Handbook of Coffee Processing By-Products. (Galanakis, S., eds), Elsevier, London, 2017, pp.1-2.
2. Batista, L.R., Chalfoun, S. M., Silva, C.F. y Schwan R.F., *Coffee: Types and Production*. En Encyclopedia of Food and Health (Caballero B, Finglas, P.M. y Toldrá, F., eds), Elsevier, Oxford, 2016, pp. 244-251.
  3. Belitz, W. y Grosch, P., *Schieberle Food Chemistry* 4 ed., Springer, Berlin, 2009.
  4. Cid, M.C. y de Peña M.P., *Coffee: Analysis and Composition*. En Encyclopedia of Food and Health (Caballero B, Finglas, P.M. y Toldrá, F., eds), Elsevier, Oxford, 2016, pp.225-231.
  5. Desrosier, N.W., *Elementos de tecnología de alimentos*, Compañía Editorial Continental, S.A., México, 1987.
  6. De Melo Pereira, G.V., de Carvalho Neto D.P., Magalhaes Junior A.I., Vasquez Z.S., Medeiros A.B.P, Vandenberghe L.P.S. y Soccol C.R., Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans—A review. *Food Chem*, 272, pp.441-52, 2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814618314663>
  7. Kulapichitr, F., Borompichaichartkul, C., Suppavorasatit, I. y Cadwallader, K.R., Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee. *Food Chem*, 291, pp.49-58, 2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814619306478>
  8. Schwan R.F. y Fleet, G.H, *Cocoa and coffee fermentations*, CRC Press, Boca Raton, 2015, pp. 614
  9. Wei, F. y Tanokura, M., *Chemical Changes in the Components of Coffee Beans during Roasting*. En Coffee in Health and Disease Prevention (Preedy, V., ed), Elsevier, Oxford, 2015, pp. 83-91



# **Camino a la Sostenibilidad: Innovadoras Estrategias para Combatir la Contaminación por dióxido de carbono CO<sub>2</sub>**

**Dr. Bertin Anzaldo**

*Laboratorio Síntesis de Complejos,  
Facultad de Ciencias Químicas  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla BUAP*

**Dr. Pankaj Sharma**

*Instituto de Química,  
Universidad Nacional Autónoma de México UNAM*

**Dra. Maribel Arroyo-Carranza**

*Centro de Química del Instituto de Ciencias,  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla BUAP*



**Abstract**

The transformation of nontoxic carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) into fuels and valuable chemicals has become an interesting approach to address CO<sub>2</sub> emissions and can help in addressing climate change. A promising solution lies in using solar energy to convert CO<sub>2</sub> into useful materials, which could pave the way for a more sustainable future. Solar energy has the potential to trigger chemical reactions that enable the production of plastics and pharmaceuticals. Researchers are working on different approaches, such as photocatalysis, photoelectrochemical conversion, and microbial photoelectrochemical conversion, to transform CO<sub>2</sub> into valuable chemicals and fuels using solar energy. These methods can reduce the environmental impact of emissions and help address climate change while also providing opportunities for the production of useful materials.

**Palabras clave:** Energía, Dióxido de carbono, Fotocatalizador, Combustibles.

**Keywords:** Energy, Carbon dioxide, Photocatalyst, Fuels.

**Una Solución Brillante: El Proceso Revolucionario a partir de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> para producir diversos Productos Químicos y Combustibles**

La vida moderna depende críticamente de un flujo constante de energía, utilizado por la humanidad en forma de combustibles, electricidad y calor. Actualmente, más del 80% de la energía primaria mundial proviene de fuentes fósiles como carbón, petróleo y gas. Estos combustibles, creados a partir de biomasa acumulada durante millones de años, han sido esenciales para las actividades humanas, proporcionando energía, pero también emitiendo dióxido

de carbono (CO<sub>2</sub>). Desde el inicio de la era industrial, la humanidad ha utilizado el exceso de luz solar fosilizada acumulada durante millones de años (combustibles fósiles). En consecuencia, el CO<sub>2</sub> que se fijó en forma de carbohidratos mediante la fotosíntesis y se almacenó durante millones de años está regresando a la atmósfera a un ritmo increíblemente alarmante, a través de la quema de los combustibles fósiles (Peter, 2018, p 1557). En las últimas décadas, ha quedado claro que el CO<sub>2</sub> liberado de esta manera ha afectado la estabilidad climática. Las emisiones de dióxido de carbono son un problema que la humanidad debe abordar urgentemente para evitar una catástrofe climática, siendo de las mayores amenazas que enfrenta la sociedad en la actualidad. Considerando que las emisiones globales de CO<sub>2</sub> son alrededor de varios millones de toneladas métricas por año, la conversión de CO<sub>2</sub> en productos químicos útiles podría, con el paso del tiempo, tener un impacto positivo en el problema de estas emisiones. Una de las propuestas para reducir el costo de la captura del CO<sub>2</sub> es venderlo para su uso posterior. Como resultado, el CO<sub>2</sub> ahora se considera también una mercancía, y la tecnología de captura, uso y almacenamiento de carbono (en su forma de CO<sub>2</sub>) es conocida con un nuevo acrónimo: CCUS (Carbon Capture, Use and Storage; por sus siglas en inglés).

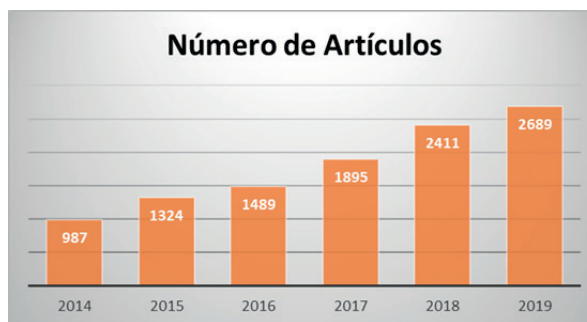
En relación con el aprovechamiento del dióxido de carbono, el mayor uso actual del CO<sub>2</sub> es para la producción de urea (utilizada principalmente como fertilizante) mediante la reacción de amoníaco (NH<sub>3</sub>) con CO<sub>2</sub>, seguido de la producción de policarbonatos y carbonatos cíclicos a través de la condensación catalítica de CO<sub>2</sub> con epóxidos, ambos son procesos muy importantes donde son generados nuevos enlaces

C-N y C-O, sin embargo, no implican una *reducción formal* en el sentido químico (disminución del estado de oxidación) del carbono proveniente del  $\text{CO}_2$  y por lo tanto no hay un almacenamiento significativo de energía. Por otra parte, se ha dedicado gran esfuerzo a investigar la reducción de  $\text{CO}_2$  a ácido fórmico ( $\text{HCOOH}$ ), formaldehído ( $\text{HCHO}$ ) y metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) por métodos electroquímicos, fotoelectroquímicos y catalíticos, con perspectiva a futuras economías de precursores no fósiles. Sin embargo, estos productos aún no cubren toda la materia prima necesaria para la síntesis de productos químicos finos o de combustibles de alta energía, en contraste, los petroquímicos (hidrocarburos), son fáciles de transformar en una variedad de productos químicos y poseen alto contenido de energía. Por lo tanto, es necesario desarrollar nuevos métodos de reciclaje de dióxido de carbono que combinen la reducción de  $\text{CO}_2$  y la formación de enlaces C-C, C-N y C-O, porque ejemplos de estos últimos son todavía muy escasos.

Existen ya algunas rutas para transformar  $\text{CO}_2$  a combustibles y otros productos químicos. Desde la perspectiva general de la recuperación de la inversión energética, los métodos más prometedores son los que emplean energías renovables tales como la solar, la cual es una fuente limpia, abundante y gratuita. Aunque actualmente el contenido de carbono de algunos productos generados a partir de  $\text{CO}_2$  representa sólo una muy pequeña fracción del  $\text{CO}_2$  emitido, la estrategia de la transformación de  $\text{CO}_2$  impulsada por energía solar puede extenderse a la producción de combustibles en el futuro, especialmente para la aviación donde la alta densidad de energía es inevitable, y eso representará una huella de carbono mucho mayor.

En 2018 en Roma se discutieron resultados recientes sobre el uso de la energía solar mediante reacciones fotoquímicas artificiales para cuatro aplicaciones importantes: conversión de energía solar en combustibles, conversión de luz solar en energía eléctrica, uso de energía solar para realizar síntesis orgánicas que no proceden mediante la química convencional, y reacciones fotoquímicas para reducir la contaminación (Balzani, 2019, p 443222).

En los últimos años se han realizado muchos esfuerzos de investigación dedicados a la conversión de  $\text{CO}_2$  impulsada por energía solar (*Figura 1*) y varios programas de financiamiento nacionales e internacionales están siendo creados en el mundo para promover la investigación fundamental y el desarrollo de tecnología en este tema, resaltando el programa “SUN-ERGY”, bajo la tutela de *Horizonte Europa*, también en línea con la iniciativa de “Química Impulsada por Energía Solar” de la *Sociedad Química Europea (EuChemS)*. En los Estados Unidos, el “Joint Center for Artificial Photosynthesis” (JCAP) fue establecido en 2010, con el objetivo de encontrar nuevas y efectivas formas de producir combustibles utilizando sólo luz solar, agua y  $\text{CO}_2$  (He, 2020, p 1996).



*Figura 1. Número de artículos publicados de 2014–2019 dedicados a la conversión de  $\text{CO}_2$  impulsada por energía solar. Datos colectados de Web of Science Core Collection (He, 2020, p 1996).*



En la exploración de nuevas formas de utilizar el CO<sub>2</sub> para crear productos químicos útiles, en 2012, un grupo de científicos desarrollaron un método eficiente para convertir el CO<sub>2</sub> en formamidas (HCONR<sub>2</sub>), que son precursores importantes para fabricar medicamentos, pesticidas y varios disolventes (Gomes, 2012, p 191). En este proceso innovador a partir de aminas (R<sub>2</sub>NH) y CO<sub>2</sub>, se utilizó como agente reductor un organosilano (R<sub>3</sub>SiH), que es barato y no tóxico, junto con un catalizador llamado 1,5,7-Triazabicyclo[4.4.0]dec-5-eno (TBD). Este catalizador facilitó la transformación del CO<sub>2</sub> en las formamidas al promover la inserción del CO<sub>2</sub> en el enlace NH de las aminas. La gran ventaja de este método es que utiliza condiciones de reacción muy suaves, y organosilanos (R<sub>3</sub>SiH) en lugar de H<sub>2</sub> como agente reductor, lo que hace más económico el proceso en comparación con el método de formulación de aminas que emplea CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>. Además, este método puede transformar una más amplia variedad de aminas, y no necesita usar disolventes.

Pero reciclar el CO<sub>2</sub> a combustibles y productos químicos valiosos siempre ha requerido demasiada energía para tener un beneficio económico. La emergente alternativa, que involucra el uso de la energía solar en lugar de combustibles fósiles para convertir el exceso de dióxido de carbono en productos esenciales, trabaja en forma dual: reduciendo las emisiones y consumiendo el CO<sub>2</sub> ya existente.

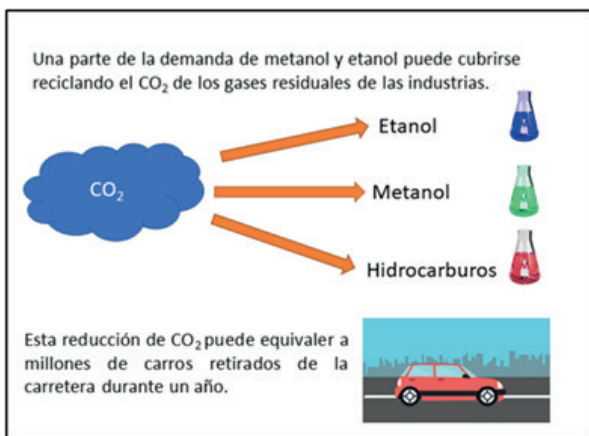
La energía que nos proporciona el sol podría ser la clave para una revolución energética. En solo una hora, el sol nos brinda la misma cantidad de energía que consumimos en un año a través de fuentes como el petróleo, el gas y la energía nuclear (ht-

[tps://energeticafutura.com/blog/cuanta-energia-se-puede-extraer-de-la-radiacion-solar/](https://energeticafutura.com/blog/cuanta-energia-se-puede-extraer-de-la-radiacion-solar/)). A diferencia de otras fuentes de energía, como los combustibles fósiles, el sol tiene una esperanza de vida de más de 9 mil millones de años. Esto significa que, si aprendemos a aprovechar su radiación, tendremos energía disponible durante un tiempo extremadamente prolongado. Este potencial energético enorme nos ofrece la oportunidad de dejar gradualmente atrás las fuentes de energía convencionales y adoptar alternativas limpias y sostenibles.

Plantas, algas y ciertas bacterias, sistemas basados en la energía solar, tienen la sorprendente capacidad de transformar dióxido de carbono y agua en compuestos químicos ricos en carbono, hidrógeno y oxígeno. La fotosíntesis, un proceso biológico esencial, ejemplifica cómo la energía solar se captura y almacena. Desarrollar sistemas artificiales que puedan igualar o superar la eficiencia de estos procesos naturales es un reto crucial para avanzar hacia un manejo de la energía más sostenible. Observando este comportamiento, algunos investigadores emplearon la estrategia de imitar el proceso de fotosíntesis, aprovechando la luz solar. Pero este tipo de reactores a menudo necesitan funcionar a temperaturas alrededor de 1000 °C, demasiado altas para manejarlas a gran escala. Otros químicos desarrollan métodos para realizarlas a temperaturas cercanas a las ambientales mediante el uso de nuevos catalizadores. Los procesos de conversión fotocatalítica y fotoelectroquímica para transformar el CO<sub>2</sub> en productos químicos valiosos son altamente dependientes de la energía necesaria para activar la reacción, en particular, al CO<sub>2</sub> que es termodinámicamente muy estable debido a sus dos fuertes enlaces dobles C=O (con una ener-

gía de enlace de  $532.2 \pm 0.4$  kJ/mol). Como resultado, se requiere una gran cantidad de energía para superar la barrera de activación en la conversión de esta molécula. Esto subraya la extrema importancia de la elección del fotocatalizador en sistemas de este tipo (Yau, 2022, p 16396).

La investigación y desarrollo de la química en la conversión sostenible a través de la energía solar está adquiriendo un impulso significativo, y esto no podría haber llegado en un momento más oportuno. A medida que enfrentamos desafíos ambientales cada vez mayores, como la escasez de recursos, la capacidad de aprovechar la energía solar para impulsar nuestras necesidades químicas se convierte en una prometedora solución para un futuro más limpio y sostenible (*Figura 2*).



*Figura 2. Productos potenciales derivados del reciclaje de CO<sub>2</sub> generado por las industrias.*

### La luz UV en la conversión de CO<sub>2</sub>

La química impulsada por la luz con catalizadores foto-redox abre caminos más sostenibles y eficientes energéticamente para utilizar el CO<sub>2</sub> y convertirlo en precursores y productos útiles. Los catalizadores foto-redox orgánicos usan luz visible o ultravioleta para activarse. Luego, apagan

estos estados utilizando un donador de sacrificio como Et<sub>3</sub>N (trietilamina) para generar un anión radical muy reactivo capaz de iniciar la reducción del CO<sub>2</sub> y realizar transformaciones químicas que, de otra manera, serían térmicamente exigentes. En una investigación reciente, se analizó la velocidad de transferencia de electrones para la reducción de CO<sub>2</sub> con catalizadores foto-redox orgánicos, específicamente aniones radicales de oligo(p-fenilenos) substituidos (OPPs), para evaluar nuevas formas de utilizar el CO<sub>2</sub>. Además, la etapa de transferencia electrónica (reducción de CO<sub>2</sub>) también sirve para regenerar el OPP (Kron, 2020, p 5359). Mejorar las tasas de transferencia de electrones, aumentando la capacidad donadora de los sustituyentes en el oligofenileno, podría ser una forma de desarrollar mejores catalizadores activos. Sin embargo, los investigadores demostraron que los coeficientes de velocidad disminuyen al hacer esto, ya que otros factores, como la presencia de pares solitarios en el sustituyente, también son importantes y pueden influir en el proceso de manera inesperada. Este fue el primer estudio computacional de su tipo, ya que los investigadores no habían examinado previamente el mecanismo subyacente de cómo se mueve un electrón desde una molécula orgánica como el oligofenileno al CO<sub>2</sub>. El equipo descubrió que pueden llevar a cabo modificaciones sistemáticas en el catalizador de oligofenileno, agregando grupos de átomos que otorgan propiedades específicas cuando están unidos a estas moléculas, lo que tiende a empujar los electrones hacia el centro del catalizador, acelerando la reacción.

En 2020 destaca un artículo de revisión acerca de recientes investigaciones de la conversión de CO<sub>2</sub> en combustibles y pro-

ductos químicos de alto valor utilizando la energía solar (He, 2020, p 1996) como una prometedora solución que se puede abordar desde diversos enfoques, como la conversión biofotosintética (BPS), fotosintética (PS), fotocatalítica (PC), fototérmica (PT), fotoelectroquímica microbiana (M-PEC) y la fotovoltaica más electroquímica (PV+EC). Estos métodos eficientes permiten transformar el dióxido de carbono en valiosos combustibles y otros productos químicos, todo gracias al poder del sol. Este enfoque no sólo representa una innovadora manera de aprovechar las fuentes de energía renovable, sino que también involucra la variedad de las técnicas mencionadas, y la estrategia de convertir los residuos en riqueza desempeñará un papel clave en la transformación verde de la industria química. La conversión biofotosintética de CO<sub>2</sub>, se inspira en la fotosíntesis, y emplea enzimas redox, como microorganismos o fotocatalizadores artificiales para la fotosíntesis. Un enfoque completamente diferente es la conversión fototérmica de CO<sub>2</sub>, que emplea reactores solares de alta temperatura, por radiación solar concentrada, para desdoblarse el CO<sub>2</sub>, ofreciendo un potencial de producción significativo. La conversión fotoelectroquímica microbiana del CO<sub>2</sub> aprovecha nanodispositivos semiconductores y biocatalizadores altamente selectivos para generar combustibles y otros productos químicos. La conversión PV+EC combina las celdas fotovoltaicas con la electrólisis de CO<sub>2</sub> en un solo dispositivo. Este enfoque separa las etapas de recolección de luz y la conversión electroquímica. Entre todos estos enfoques, los más estudiados son la fotosíntesis (PS), la fotocatalisis (PC), la fotoelectroquímica (PEC) y la combinación de energía fotovoltaica con procesos electroquímicos (PV+EC), debido a su idonei-

dad para condiciones suaves de presión y temperatura. Un análisis amplio y profundo de estos investigadores, comparando diferentes parámetros (actividad, selectividad y durabilidad), les llevó a concluir que sólo el enfoque PV+EC muestra un comportamiento, especialmente en términos de actividad y durabilidad, que puede conducir a tecnologías industriales en el futuro cercano.

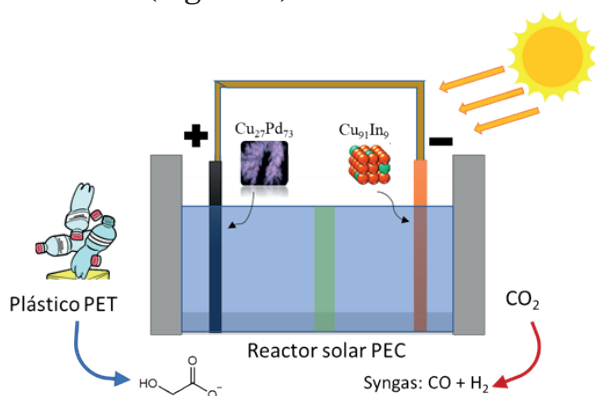
En la transformación del CO<sub>2</sub> en otras sustancias químicas, que involucran metodologías termoquímicas, fotoquímicas y rutas electroquímicas, la elección de los catalizadores y la tecnología de los procesos es crítica y varía sustancialmente dependiendo del método empleado. Por ejemplo, en las reacciones termoquímicas, es fundamental que los catalizadores mantengan su estabilidad a temperaturas elevadas. Por otro lado, en el método electroquímico, el catalizador debe ser capaz de minimizar la competencia de la formación de H<sub>2</sub> en la reacción. Por último, en el método fotoquímico, se requiere un semiconductor con una banda prohibida mínima de 1.23 eV (Peter, 2018, p 1557).

### **Catalizador de doble membrana**

En un prometedor avance hacia una economía más sostenible, un grupo de investigadores de la Universidad de Cambridge (Bhattacharjee, 2023, p 182) ha desarrollado un reactor impulsado por energía solar, utilizando botellas de plástico y dióxido de carbono para obtener combustibles y otros productos químicos. El reactor solar fotoelectroquímico (PEC) tiene dos compartimentos, separados por una membrana, con un electrodo en cada lado. En el electrodo negativo (fotocátodo), a base de perovskita, se integran diferentes catalizadores de reducción del CO<sub>2</sub> como una



porfirina de cobalto, una aleación  $\text{Cu}_{91}\text{In}_9$  o la enzima formiato deshidrogenasa, que convierten el  $\text{CO}_2$  en monóxido de carbono (CO), gas de síntesis 'syngas' (CO más  $\text{H}_2$ ) o formiato ( $\text{HCO}_2^-$ ), respectivamente. Mientras en el electrodo positivo (ánodo), de una aleación  $\text{Cu}_{27}\text{Pd}_{73}$ , en una disolución alcalina se transforman las botellas de plástico de tereftalato de polietileno en glicolato, una sustancia química utilizada en las industrias farmacéuticas y cosméticas. Los investigadores primero limpian y cortan las botellas de plástico en trozos, las sumergen en nitrógeno líquido y luego las pulverizan para crear una sustancia uniforme (*Figura 3*).



*Figura 3. Ciclo general de la celda fotoelectroquímica (PEC) que ilustra la conversión de  $\text{CO}_2$  y plástico de tereftalato de polietileno (PET) en diversos materiales.*

El sistema fotoelectroquímico general de un solo absorbente de luz funciona con la ayuda de una polarización química interna y bajo voltaje aplicado, de manera similar a los tándems de absorbentes de luz duales sin polarización, y muestra tasas de producción entre 10 y 100 veces más altas que las de los procesos de suspensión fotocatalítica convencionales. Este logro demuestra que la transformación fotoelectroquímica eficiente de  $\text{CO}_2$  en combustible, acoplada a la conversión

de plástico en otros productos químicos, es una tecnología prometedora y sostenible impulsada por la luz solar. Es esencial que los electrones generados por la luz solar posean la energía adecuada para favorecer la conversión del  $\text{CO}_2$ . Este tipo de procesos se están volviendo cada vez más viables gracias a los avances en los catalizadores activados por luz solar, conocidos como fotocatalizadores. Normalmente, los fotocatalizadores son semiconductores que requieren luz ultravioleta para generar la energía necesaria en la transformación del dióxido de carbono. Sin embargo, la luz ultravioleta es escasa (representando sólo el 5 por ciento de la luz solar) y dañina para el ser humano. El desarrollo de nuevos catalizadores que funcionen con luz visible, más abundante y benigna, ha sido, por lo tanto, un objetivo principal. En años recientes, los investigadores han desarrollado varios fotocatalizadores que rompen el doble enlace entre el oxígeno y el carbono en la molécula de dióxido de carbono. Éste es un paso crítico en la creación de "refinerías solares" que produzcan compuestos a partir de este gas. El catalizador ahora sólo requiere luz visible para generar productos químicos ampliamente utilizados como el ácido fórmico, el metanol y el formaldehído, que son esenciales en la fabricación de productos como espumas, adhesivos y desinfectantes, además sirven en la elaboración de medicamentos, detergentes, fertilizantes y textiles (Viswanathan, 2014, p 211).

En los laboratorios mencionados anteriormente, los científicos están colaborando en el diseño de fotocatalizadores más eficientes en la conversión, impulsada por la luz solar, del dióxido de carbono en productos químicos deseados. Esta mejora podría llevarnos un paso más cerca de

eliminar por completo la dependencia de los combustibles fósiles en la producción química. Además, las investigaciones también se centran en optimizar los procesos de conversión para que sean más eficaces y económicamente viables a gran escala. Al transformar el dióxido de carbono en productos valiosos, se estará un paso más cerca de formar parte de una economía sin residuos. (Balzani, 2019, p 443222).

### **Generando Syngas con Energía Solar**

El gas de síntesis o syngas, una mezcla de gases mayormente compuesta por hidrógeno y monóxido de carbono, con un poco de metano (CH<sub>4</sub>), comúnmente se produce a partir de combustibles fósiles mediante un proceso llamado reformado, el cual es un proceso muy endotérmico (costoso) y emite grandes cantidades de CO<sub>2</sub>. Esta mezcla de syngas se puede utilizar para generar petróleo sintético y combustibles líquidos. A pesar de los avances, la síntesis fotocatalítica de syngas a partir de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O sigue siendo un desafío importante debido a la ineficiente captura de fotones y a la rápida recombinación hueco-electrón. Un grupo de científicos ideó un método mediante la simple adición de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y luz solar, utilizando un material especial (cocatalizador dual), núcleo/capa de oro y óxido de cromo(III), sobre un semiconductor de InGaN/GaN crecido sobre un sustrato de silicio. Ellos lograron controlar las relaciones Au:Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para obtener rendimientos muy altos de H<sub>2</sub> y CO en variadas proporciones, así como la eficiencia “luz solar a syngas” STS (solar to syngas) en función también de las relaciones Au:Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. El cocatalizador, promueve la deformación de la molécula lineal de CO<sub>2</sub> reduciendo la barrera energética para la reducción del CO<sub>2</sub> hacia CO y, al mismo tiempo, promueve el desdoblamiento del

H<sub>2</sub>O generando el H<sub>2</sub>; haciendo posible acoplar la reacción de reducción de CO<sub>2</sub> y la electrólisis del H<sub>2</sub>O, y permitiendo modular las relaciones CO/H<sub>2</sub> obtenidas en un amplio intervalo. Estas últimas relaciones son cruciales porque afectan la producción posterior de combustibles o productos químicos específicos. En suma, la adición del cocatalizador al sistema de reactivos equivale a introducir un turbo a la reacción, permitiendo ajustar las proporciones de CO y H<sub>2</sub> obtenidas. El proceso puede escalar a nivel industrial. Aunque en estos experimentos se empleó agua destilada, se espera que funcionen también con agua de mar y otras disoluciones electrolíticas, ampliando así las materias primas. Este proceso eficiente y escalable, de producción de syngas mediante energía solar, representa un paso importante hacia una refinería química *neutra en carbono* (es decir, sin emitir CO<sub>2</sub> a la atmósfera) (Rashid, 2022, p 119).

### **El uso de CO<sub>2</sub> en la producción de queroseno**

La producción de queroseno, vía un ciclo redox termoquímico a base de CeO<sub>2</sub>, a partir de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> mediante energía solar, se logró por primera vez en una planta de torre solar completamente integrada. Este queroseno, fabricado con energía solar, tiene el potencial de reemplazar al queroseno de origen fósil, que se emplea en la infraestructura de los motores de los aviones ya existentes a nivel mundial, especialmente vitales para los vuelos de larga distancia. Esta innovadora demostración tecnológica a escala piloto, relevante para la implementación industrial, marca un nuevo giro hacia la producción de combustibles de aviación sostenibles. Una ventaja distintiva de este tipo de procesos, en comparación con otros de enfoque solar, radica

en su capacidad para controlar el flujo de  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$  de manera simultánea o independiente. Esto permite un control preciso de la calidad del gas de síntesis obtenido (mezcla de  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}$ ), en términos de pureza y estequiometría, obteniendo así una mezcla óptima para la síntesis del queroseno vía el proceso Fischer-Tropsch (FT). Si bien se pueden implementar múltiples antenas solares, éstas tienen limitaciones de tamaño debido a restricciones mecánicas y ambientales, las plantas de torre solar en cambio ofrecen ventajas de economía de escala. La planta de combustibles de torre solar está integrada por tres subsistemas: la torre de concentración solar, el reactor solar ( $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$ ), y la unidad gas a líquido (GtL) (proceso FT). La tecnología de torre solar es una perspectiva prometedora y representa un hito en la cadena de procesos de conversión de energía solar a combustibles (Figura 4). Esta planta a escala piloto, allana el camino hacia la implementación global de la producción de combustibles solares, si se captura  $\text{CO}_2$  del aire o se obtiene de fuentes biogénicas (Zoller, 2022, p 1606).

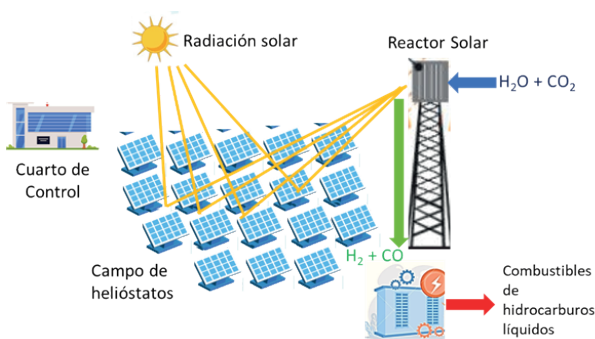


Figura 4. Planta de combustible de torre solar con instalaciones de concentración, torre solar y área de procesamiento.

### Una alternativa para la producción de los plásticos

El lado oscuro de los desechos plásticos

puede eclipsar su importancia: sin duda, el plástico revolucionó la vida en el siglo XX, duradero, maleable y versátil. Sin plástico, no se tendrían grabaciones de la música y las películas. La medicina moderna utiliza también el plástico: bolsas de sangre, jeringas y tubos flexibles. Piezas de automóviles, materiales ligeros para aeronaves, satélites y transbordadores espaciales, todos dependen del plástico. Y, por supuesto, las computadoras, teléfonos y todas las formas de tecnología de internet. Casi todas las personas que leen estas palabras lo hacen gracias al plástico. Aparte del problema de la eliminación, también se debe considerar el origen del plástico. Es fácil olvidar que los plásticos están hechos de combustibles fósiles. Alrededor del 4% del petróleo y el gas que utilizamos anualmente se destina a la producción de polímeros, lo que significa que la producción de plástico está vinculada a la extracción de combustibles fósiles y al cambio climático. Hay una alternativa que los químicos han estado persiguiendo durante más de una década, y después del trabajo de varios investigadores empieza a dar sus frutos: plásticos hechos a partir de dióxido de carbono. Actualmente los investigadores están trabajando en métodos para capturar emisiones industriales de  $\text{CO}_2$  y de ahí poder generar diversos plásticos. No solo reduciría la cantidad de combustibles fósiles que utilizamos, sino que también tendría un impacto en el cambio climático reduciendo la cantidad de gases de efecto invernadero (Peter, 2018, p 1557). En este sentido, los científicos han desarrollado un método para convertir el dióxido de carbono en etileno, la materia prima utilizada para fabricar el plástico más comúnmente utilizado que es el polietileno. Aproximadamente la mitad del plástico que se produce a nivel mun-



dial se crea con etileno, lo que convierte a éste en una de las materias primas más importantes del mundo. Puede que se necesiten unos 20 años para producir comercialmente el polietileno a partir de etileno hecho de dióxido de carbono. Se han realizado numerosos estudios que aprovechan la luz solar para llevar a cabo la conversión de CO<sub>2</sub> mediante fotocatalizadores o semiconductores, conocidos como procesos fotosintéticos (PS) y fotocatalíticos (PC). La clave para hacer plástico a partir de dióxido de carbono radica en el diseño de catalizadores (materiales que aceleran la velocidad de una reacción química sin agotarse en el proceso) sofisticados. Un grupo de investigadores ha desarrollado un método innovador de electro-redeposición de Cu para estabilizar algunas especies de Cu<sup>+</sup> y optimizar su morfología, con el fin de que tengan un impacto significativo en la producción activa de etileno (De Luna, 2018, p 103). Los resultados, revelan que esta estrategia mejora la estabilidad de las especies de Cu<sup>+</sup> incluso a potenciales negativos, manteniéndose efectiva durante largos períodos de reacción. Al controlar la morfología y el estado de oxidación del catalizador, se puede reducir la producción de metano y aumentar significativamente la producción de etileno.

En el Reino Unido, *Econic* también está produciendo poliuretano a partir de dióxido de carbono y espera tenerlo en los estantes dentro de dos años, así como recubrimientos, selladores y elastómeros. Estos materiales no solo igualan la calidad de los plásticos convencionales, sino que en algunos aspectos incluso pueden superarlos. *Econic* estima que si el 30 por ciento de todos los polioles (los polioles son compuestos químicos que contienen múltiples grupos hidroxilo “OH”) se fabricaran

a partir de dióxido de carbono, esto resultaría en un ahorro de millones de toneladas de dióxido de carbono en la atmósfera, que sería equivalente a aumentar millones de árboles o retirar gran cantidad de autos de la carretera (<https://www.science.org/content/article/two-new-ways-turn-garbage-carbon-dioxide-fuel>).

En un avance significativo, se ha desarrollado una alternativa para producir policarbonato, un material común en domos, ventanas y envases reutilizables como biberones. Esta innovación implica combinar dióxido de carbono con azúcares, como la xilosa, que se encuentra en fuentes fácilmente accesibles como posos de café. A diferencia de los métodos convencionales que utilizan sustancias tóxicas, como el fosgeno y el bisfenol-A, esta nueva técnica se destaca por su seguridad, lo que la hace apropiada para materiales de aplicaciones médicas, tales como suturas e incluso estructuras de órganos (<https://www.science.org/content/article/two-new-ways-turn-garbage-carbon-dioxide-fuel>).

La reducción de CO<sub>2</sub> a CO, a través de la reacción,  $\text{CO}_2 + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ , genera un producto químico rico en energía que puede combinarse con el H<sub>2</sub>O a través de la reacción de desplazamiento gas-agua y producir H<sub>2</sub>, y así la mezcla CO/H<sub>2</sub> puede conducir a la producción de combustibles líquidos por el método Fischer-Tropsch, sin embargo, se requiere un electrocatalizador que sea eficiente. El bismuto, en conjunción con líquidos iónicos, se presenta como un económico prometedor candidato para este proceso, Bi-CMEC (Bismut-Carbon Monoxide Evolving Catalyst), ya que este metal no sólo es amigable con el medio ambiente al ser no tóxico, sino que también se obtiene como subproducto del refinado de

plomo (Pb), cobre (Cu) y estaño (Sn), lo que garantiza un suministro constante. Además, dado que el bismuto no tiene numerosas aplicaciones comerciales importantes, su precio se mantiene asequible y estable (DiMeglio, 2013, p8798). Se probó la capacidad del electrodo bimodificado para activar electroquímicamente el  $\text{CO}_2$  en MeCN, un disolvente que ofrece una amplia ventana electroquímica y se utiliza con frecuencia en la electrocatálisis del  $\text{CO}_2$ .

La colaboración entre académicos, empresas emergentes y líderes industriales será esencial para llevar estos avances, de hacer el mejor uso de energía perenne (solar, eólica, hidráulica y geotérmica-SWHG) y renovable (biomasa) en conjunción con el uso y reciclaje del  $\text{CO}_2$ , a la corriente principal y convertir la visión de una economía circular en una realidad. La economía circular y la bioeconomía se fusionan en una estrategia global que busca reciclar el carbono a través de la conversión del  $\text{CO}_2$ . El uso de energía solar para el coprocesamiento del  $\text{H}_2\text{O}$  y el  $\text{CO}_2$  permite convertir dos moléculas muy estables en productos útiles, como hidrocarburos ricos en energía o sus derivados, más oxígeno, que puede recolectarse por separado y ser comercializado. Éste es un futuro, que imita plenamente los procesos naturales. El objetivo es cambiar de una economía lineal que produce residuos a una economía cíclica que imita a la naturaleza, reciclando bienes usados y reduciendo la extracción de recursos naturales y la carga ambiental. Esto implica el uso de energía solar y sistemas biológicos para reducir la huella de carbono y avanzar hacia un futuro más sostenible (Aresta, 2020, p159). A medida que los avances de la química en la transformación sostenible se aceleran, nos encontramos en una encrucijada crítica.

ca. La elección de adoptar y apoyar estas tecnologías prometedoras, que representa un compromiso con un futuro más limpio y sostenible, o continuar con metodologías contaminantes que conducen al deterioro extremo o catastrófico del planeta. La oportunidad de convertir el dióxido de carbono en una valiosa materia prima química y eliminar gradualmente nuestra dependencia de los combustibles fósiles está al alcance de la mano.

### Conclusión

La conversión de  $\text{CO}_2$  juega un papel fundamental en la transición hacia una economía sostenible. La capacidad de reutilizar este gas para producir productos químicos y combustibles no solo contribuye a la reducción de emisiones, sino también fomenta el aprovechamiento de este gas contaminante. Esto nos acerca a la visión de una nueva industria química, que considere al  $\text{CO}_2$  como una fuente abundante de carbono y se convierta en parte de una economía circular sin residuos.

En este contexto, la energía solar se presenta como una aliada para los procesos de transformación del  $\text{CO}_2$ . Tecnologías como la fotoelectroquímica, la fotocatalisis y la fotoelectrosíntesis ofrecen alternativas limpias y prometedoras frente a los métodos tradicionales que dependen de combustibles fósiles. Innovaciones como el desarrollo de fotocatalizadores activos bajo luz visible permitirán superar barreras energéticas y aumentar las tasas de conversión, acercando cada vez más estas tecnologías a su implementación a gran escala.

Además, la transformación del  $\text{CO}_2$  abre la puerta a una amplia gama de productos derivados, como metanol, ácido fórmico, formaldehído y syngas, todos con aplica-

ciones industriales. Procesos innovadores, como la conversión simultánea de CO<sub>2</sub> y plásticos, amplían las oportunidades para una industria más sostenible y rentable.

Estos avances científicos no sólo son un paso adelante en la batalla contra el cambio climático, sino que también representan un esfuerzo en reducir las emisiones de carbono. La siguiente fase implica la incorporación de estos logros en la infraestructura de la industria química a gran escala, lo cual demandará la necesidad de fuertes inversiones y colaboraciones estratégicas entre los sectores público y privado.

Las iniciativas internacionales y los programas de financiamiento desempeñan un papel fundamental en este contexto, sin embargo, aún persisten desafíos que deben abordarse para garantizar la adopción masiva y la sostenibilidad a largo plazo de estas tecnologías. La colaboración interdisciplinaria entre la academia, la industria y los tomadores de decisiones será esencial para superar estos obstáculos, asegurando que se prioricen la sostenibilidad ambiental y económica en cada paso del proceso.

### Referencias

Aresta, M., y Dibenedetto A., Carbon Recycling Through CO<sub>2</sub>-Conversion for Stepping Toward a Cyclic-C Economy. A Perspective. *Front. Energy Res.*, 8, 159, 2020. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00159>.

Balzani, V., Pacchioni, G., Prato, M. y colaboradores. Solar-driven chemistry: towards new catalytic solutions for a sustainable world. *Rend. Fis. Acc. Lincei*, 30, pp.443–452, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12210-019-00836-2>.

Bhattacharjee, S., Rahaman, M., Andrei, V. y colaboradores. Photoelectrochemical CO<sub>2</sub>-to-fuel conversion with simultaneous plastic reforming. *Nat. Synth.*, 2, pp.182–192 2023. <https://doi.org/10.1038/s44160-022-00196-0>.

De Luna, P., Quintero-Bermudez, R., Dinh, CT. y colaboradores. Catalyst electro-redeposition controls morphology and oxidation state for selective carbon dioxide reduction. *Nat Catal.*, 1, pp.103–110, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41929-017-0018-9>.

DiMeglio, J. L. y Joel Rosenthal. Selective Conversion of CO<sub>2</sub> to CO with High Efficiency Using an Inexpensive Bismuth-Based Electrocatalyst. *J. Am. Chem. Soc.*, 135[24], pp.8798-8801, 2013. <https://doi.org/10.1021/ja4033549>.

Gomes, C. Das N., Jacquet, O., Villiers, C., Thuéry, P., Ephritikhine, M. y Cantat, T. A Diagonal Approach to Chemical Recycling of Carbon Dioxide: Organocatalytic Transformation for the Reductive Functionalization of CO<sub>2</sub>. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 51, pp.187-190, 2012. <https://doi.org/10.1002/anie.201105516>.


He, J., y Janáky, C. Recent Advances in Solar-Driven Carbon Dioxide Conversion: Expectations versus Reality. *ACS Energy Letters*, 5[6], pp.1996-2014, 2020. <https://doi.org/10.1021/acscenergylett.0c00645>.

Kron, K. J., Gomez, S. J., Mao, Y., Cave, R. J., y Sharada, S. M. Computational Analysis of Electron Transfer Kinetics for CO<sub>2</sub> Reduction with Organic Photoredox Catalysts. *The Journal of Physical Chemistry A*, 124[26], pp.5359-5368, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.0c03065>.



- Peter, S. C. Reduction of CO<sub>2</sub> to Chemicals and Fuels: A Solution to Global Warming and Energy Crisis. *ACS Energy Letters*, 3[7], pp.1557-1561, 2018. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.8b00878>.
- Rashid, R. T., Chen, Y., Liu, X., Zhou, B., y colaboradores. Tunable green syngas generation from CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O with sunlight as the only energy input. *PNAS*, 119[26], e2121174119, 2022. <https://doi.org/10.1073/pnas.2121174119>.
- Viswanathan, B. Reduction of Carbon Dioxide: Photo-Catalytic Route to Solar Fuels. Lee, J. (eds) *Materials and Processes for Solar Fuel Production*. Nanostructure Science and Technology, vol 174. Springer, New York, NY. p211, 2014. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1628-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1628-3_11).
- Yau, M. C. M., H. Martin y Kalathil, S. Biocatalytic conversion of sunlight and carbon dioxide to solar fuels and chemicals. *RSC Adv.*, 12, 16396, 2022. <https://doi.org/10.1039/d2ra00673a>.
- Zoller, S., Koepf, E., Nizamian, D., Stephan, M., Patane, A., Haueter, P., Romero, M., Gonzalez-Aguilar, J., Lieftink, D., Wit, de E., Brendelberger, S., Sizmann, A., y Steinfeld, A. A solar tower fuel plant for the thermochemical production of kerosene from H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>. *Joule*, 6[7], P1606-1616, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.06.012>.





**Parásitos y Hospederos:  
una íntima interacción  
ecológica que coevoluciona  
a lo largo de una compleja  
carrera a través del tiempo**

**Dr. Omar Domínguez-Castanedo**

**Dr. J. Jaime Zúñiga-Vega**

*Laboratorio de Ecología Evolutiva y Demografía Animal,  
Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.*

**M. en C. Jorge Gaspar-Navarro**

*Laboratorio de Sanidad Acuícola y Parasitología Molecular,  
Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Xochimilco*



**Resumen.**

El parasitismo es una relación ecológica negativa de explotación fisiológica entre dos especies, en la que únicamente uno de los organismos antagonistas involucrados se beneficia: el parásito. El otro involucrado, el hospedero, es un organismo del cual el parásito obtiene nutrientes durante una o todas las fases de su vida. En este artículo se analiza esta relación desde una perspectiva ecológica y evolutiva, tomando como ejemplo a los helmintos como parásitos y a los peces como hospederos, para ejemplificar los efectos adversos derivados de esta relación. Entre los efectos negativos que los parásitos pueden infringir a sus hospederos se encuentran la reducción del éxito reproductor o de su sobrevivencia; la disminución o merma de la condición corporal (disminución de su salud), y la influencia o manipulación del comportamiento “normal” de los hospederos, en un claro ejemplos de coevolución en una de las relaciones ecológicas más interesantes y extendidas en la naturaleza: la relación parásito-hospedero.

**Palabras clave:** Helmintos; hospederos intermediarios; coevolución

**Abstract.**

The parasitism is a negative ecological relationship of physiological exploitation between two species, in which only one of the antagonistic organisms involved benefits: the parasite. The other involved, the host, is an organism from which the parasite obtains nutrients during one or all phases of its life cycle. This article analyzes this relationship from an ecological and evolutionary perspective, taking helminth as parasites and fish as hosts, as an example to exemplify the adverse effects derived from this relationship.

Among the negative effects that parasites can inflict on their hosts are the reduction of reproductive success or survival; the decrease or loss of body condition (decrease in health), and the influence or manipulation of the “normal” behavior of the hosts, in a clear examples of coevolution in one of the most interesting and widespread ecological relationships in nature: parasite-host relationship.

**Keywords:** Helminths; parasites, fishes, hosts, intermediate hosts; coevolution

**Introducción**

Los organismos vivos comparten tiempo y espacio a lo largo de su historia evolutiva, generando relaciones ecológicas o *simbiosis* (palabra que significa “vida en común”) omnipresentes en los tres dominios de los seres vivos: Bacteria, Archaea y Eucariota. Estas relaciones pueden ser temporales o permanentes, obligatorias o facultativas, positivas o negativas, ocasionales o accidentales.

Las simbiosis son, por lo tanto, un conjunto de interacciones ecológicas entre organismos que se pueden ubicar a lo largo de un continuo, donde en uno de los polos se encuentran las relaciones mutualistas y en el otro, las relaciones parasitarias. En las interacciones que se acercan al polo del mutualismo, la confluencia de intereses entre los involucrados, tiende a hacerse cada vez más estrecha, creando incluso una dependencia fisiológica mutua. En casos extremos, estas relaciones pueden llegar a la pérdida de identidad de uno de los involucrados, mediante la integración de sus genomas (por ejemplo, esto ocurrió en la relación ancestral que dio origen a la célula eucariota). Por otro lado, en las relaciones parasitarias, no existe una coinci-



dencia de intereses entre los asociados, ya que únicamente uno de ellos se beneficia de la maquinaria metabólica del otro, sin aportar algún beneficio, e incluso, pudiendo ocasionarle daños.

El parasitismo es una relación ecológica negativa de explotación fisiológica, en la que solo uno de los organismos antagonistas involucrados se beneficia: el parásito. El otro involucrado, el hospedero, es un organismo generalmente de mayor tamaño que los parásitos (sin embargo, esto no es una regla y existen excepciones interesantes), del cual obtienen nutrientes los organismos que los parasitan durante una o todas las fases de su vida. Además de cubrir con las necesidades nutricionales de los parásitos, los hospederos pueden también ser utilizados temporalmente como intermediarios, es decir, como vehículos para alcanzar a otros hospederos, en los que concluyen su ciclo de vida. Los parásitos son capaces de causar efectos anatómicos y fisiológicos negativos e incluso pueden generar alteraciones en el comportamiento “normal” del hospedero.

En este artículo se analiza, primero, la relación parásito-hospedero desde una perspectiva ecológica y evolutiva, para después analizar esta relación y los efectos negativos que pueden llegar a tener como resultado, usando a los peces y a los helmintos, como un ejemplo en particular.

### **Relación parásito-hospedero**

Estrictamente hablando, la relación parásito-hospedero incluye patógenos como virus, bacterias, protozoarios, hongos, vegetales y animales, por lo que esta interacción representa probablemente una de las más extendidas y exitosas en toda la naturaleza. Algunos autores estiman que esta

relación es tan extensa que entre el 35% y el 50 % de los organismos de la tierra desarrollan este estilo de vida. Los parásitos, al mantener una relación ecológica negativa con sus hospederos, producen efectos adversos. Estos efectos negativos se conocen como “virulencia”. La virulencia causada por la infección parasitaria depende del daño que el parásito cause a su hospedero (en otras palabras, de la gravedad de la enfermedad), o incluso, se calcula con la tasa de mortalidad que genera el parásito a los individuos dentro de una población. Sin embargo, es importante mencionar que también suele estimarse la virulencia en términos de la tasa de reproducción del parásito o de su capacidad para infectar a más hospederos.

Entre los efectos negativos que los parásitos pueden infringir a sus hospederos se encuentran: (i) la reducción del éxito reproductivo (es decir, afectan la capacidad de su hospedero para generar descendencia o su sobrevivencia); (ii) la disminución o merma de la condición corporal (disminución de su salud), y (iii) la influencia o manipulación del comportamiento “normal” de los hospederos. Por lo tanto, los parásitos “roban” recursos nutricionales de sus hospederos, lo que puede ocasionar la mayor parte de los daños. Sin embargo, los parásitos también pueden afectar anatómicamente a sus hospederos (derivado del movimiento a través de sus tejidos), y fisiológicamente, debido a que causan compromisos energéticos al hospedero, derivados de los costos de iniciar y mantener una respuesta inmune para combatir a los parásitos.

Entre los animales que desarrollan una vida parasitaria están los “helmintos”, palabra que proviene del griego “gusano”.

Este término incluye a los platelmintos o gusanos planos (monogéneos, digéneos, céstodos y trematodos); a los nematodos o gusanos redondos, a los acantocéfalos o gusanos con cabeza espinosa, y a los anélidos o gusanos segmentados. Los helmintos se caracterizan por desarrollar, de forma obligatoria, parte de sus ciclos de vida en el interior de sus hospederos, es decir, son endoparásitos.

Los organismos que tienen una vida parasitaria dentro de sus hospederos, evolucionan a través de ciclos de vida muy complejos, con la finalidad de adaptar las etapas de su ciclo de vida al de sus hospederos, ya que dependen de ellos para sobrevivir. Sin embargo, no todos los hospederos pueden darles las condiciones adecuadas para madurar sexualmente y reproducirse. Esto puede deberse a: (i) la cantidad de nutrientes disponibles, por ejemplo, es de esperarse que una garza o un mapache puedan aportar más recursos que un pequeño pez, (ii) las interacciones entre los parásitos, es decir, los parásitos compiten entre ellos cuando infectan a un mismo hospedero, (iii) la compatibilidad entre los ciclos de vida del hospedero y de los parásitos, y (iv) el sistema de defensa de los hospederos, cuestión que se abordará un poco más adelante.

Por lo tanto, el ciclo de vida de una enorme cantidad de helmintos es “indirecto”, es decir, requieren infectar a diferentes hospederos para completar su ciclo de vida, en su hospedero definitivo (el hospedero en el que maduran sexualmente). El medio que usan los parásitos para cambiar de hospedero es la depredación, razón por la cual, el ciclo de vida de los parásitos está estrechamente relacionado con las redes tróficas.

Por ejemplo, los trematodos del género *Clinostomum* (presente en todos los continentes de la tierra) tienen un ciclo de vida complejo, que incluye hasta tres hospederos, dos intermediarios como caracoles y peces, y uno definitivo, típicamente las aves. Estos parásitos se alojan de forma definitiva y maduran sexualmente en diversas regiones del tracto gastrointestinal de aves consumidoras de peces (se han reportado hasta en 40 especies de aves). Sin embargo, estos parásitos pueden usar ocasionalmente a reptiles y mamíferos (incluyendo el hombre) como hospederos definitivos. En ellos, los parásitos se reproducen, liberando sus huevos dentro del sistema digestivo, permitiéndoles salir de sus hospederos y diseminarse en el medio ambiente mediante sus heces, idealmente en cuerpos de agua. Una vez fuera de sus hospederos, los parásitos pueden infectar a su primer hospedero, los caracoles, para avanzar en sus primeras etapas de desarrollo en su interior. Una vez que han avanzado en su desarrollo, los parásitos salen de los caracoles infectando pequeños peces o anfibios (activa o pasivamente al momento de ser consumidos por estos animales). En estos hospederos los parásitos se nutren y esperan (en algunos casos son capaces de disminuir su metabolismo por largos periodos de tiempo) hasta que un hospedero definitivo adecuado, como las aves, depreden a los peces o anfibios, para completar en su interior su desarrollo como adultos capaces de producir a las siguientes generaciones de parásitos.

Esta complejidad, expresada en los ciclos de vida de los parásitos, solo puede explicarse por una íntima interacción entre hospederos y parásitos a lo largo de innumerables generaciones de individuos que evolucionan juntos. Este proceso de evolución mutua se

le llama coevolución, e implica cambios recíprocos entre las especies que interactúan. Janzen (1979) propuso la definición más aceptada hasta hoy de coevolución: *“es el cambio evolutivo en una característica de los individuos de una población en respuesta a otra característica de los individuos de una segunda población, seguido de una respuesta evolutiva en la segunda población al cambio producido en la primera”*. En la coevolución de la relación parásito-hospedero, estos cambios recíprocos consisten en adaptaciones de los parásitos para infectar a sus hospederos y evadir sus defensas físicas e inmunológicas, mientras que los hospederos evolucionan, desarrollando mejores defensas contra de los parásitos. Esto implica que la coevolución de la relación parásito-hospedero es continua y dinámica, como lo que sugiere “la hipótesis de la reina roja” propuesta por Van Valen (1973) en su obra titulada “Una nueva teoría evolutiva”. En esta hipótesis, el autor explica que existe una carrera evolutiva de armamentos en las relaciones antagónicas (por ejemplo, depredador-presa, plantas-herbívoros o parásito-hospedero), donde uno de los involucrados evoluciona, desarrollando ciertas estrategias (conductuales, fisiológicas, o morfológicas), para obtener algún beneficio del otro. En respuesta, el otro involucrado evoluciona desarrollando rasgos conductuales, morfológicos o fisiológicos, que intentan impedir que el primero obtenga algún beneficio. Esta hipótesis se inspira en la obra “Alicia en el país de las maravillas” de Lewis Carroll, donde la reina roja le indica a Alicia que en ese lugar es necesario correr tan rápido como sea posible, para conseguir mantenerse en el mismo sitio.

De este modo, los parásitos tienden a evolucionar estrategias de evasión del sis-

tema inmune o de los mecanismos que tienen los hospederos para expulsarlos. Una estrategia puede consistir en replicación asexual extremadamente rápida que supere la velocidad de reproducción de células inmunitarias del hospedero (por ejemplo, de leucocitos como los eosinófilos y linfocitos B y T; todas estas células son capaces de desencadenar una acción defensiva ante parásitos específicos). Otra estrategia de los parásitos consiste en alojarse en sitios del cuerpo del hospedero donde no hay un fácil acceso por parte de las células inmunitarias, como el sistema muscular o el sistema nervioso. Algunas especies de trematodos se enquistan en sus hospederos intermediarios en regiones como los ojos, el cerebro o los músculos y generan una doble capa o cobertura protectora. La capa externa puede contener células modificadas del mismo hospedero, haciéndolos inmunológicamente “invisibles”. En este sentido, se sabe que algunos parásitos pueden absorber un conjunto de glicoproteínas y glicolípidos del hospedero y añadirlas a su superficie, evadiendo así la respuesta del hospedero.

### **Relación helmintos-peces**

Los peces fungen como hospedero intermediario para una enorme cantidad de helmintos con ciclos de vida indirecto. Esto responde al sitio en el que se encuentran dentro de las cadenas tróficas. Los peces de tamaño pequeño son por excelencia, “colectores” de energía dispersa en pequeños organismos como insectos, crustáceos o moluscos. Al alimentarse de ellos, los peces generan biomasa y energía suficiente para que pase a los siguientes eslabones de la cadena alimenticia, como las aves. Esto los convierte en hospederos intermediarios, ideales para que los parásitos puedan ser transmitidos de los



primeros pequeños hospederos, como caracoles o copépodos, hasta sus hospederos definitivos. De este modo, los parásitos tienden a infectar a los peces y explotarlos fisiológicamente para después enquistarse en espera de llegar a su siguiente hospedero. Por lo tanto, sus efectos suelen estar asociados al sitio de infección, a las modificaciones del comportamiento “normal” de los peces o de su desempeño, lo cual favorece la depredación. Esto puede ser considerado un rasgo evolutivo favorecido por la selección natural, junto con otros rasgos generados como producto de la interacción milenaria entre especies de hospederos y parásitos, como mejoras defensivas (físicas e inmunológicas) en los hospederos y evasivas (escape del sistema inmune, órganos de sujeción para evitar la expulsión, etc.) en los parásitos, en clarísimos ejemplos de coevolución.

### **Efectos de los helmintos en peces**

Para comprender los efectos que ocasionan los parásitos en sus hospederos intermediarios, un análisis en términos de los “costos” producidos por los parásitos a sus hospederos es muy útil. La “teoría de historia de vida”, propuesta en Stearns (1994) sugiere que los organismos invierten su energía (obtenida a partir de su alimento, en el caso de los heterótrofos), en tres actividades fundamentales: (i) crecimiento, (ii) reproducción, y (iii) mantenimiento somático. Los organismos que se encuentran bajo condiciones de estrés (por ejemplo, enfrentando a una infección parasitaria), son capaces de redireccionar su inversión energética hacia otros procesos prioritarios con el fin de compensar los costos producidos por el estrés. Sin embargo, los cambios en la reasignación de recursos generan “compromisos” que son los efectos adversos de usar energía para defenderse de los pará-

sitos sobre los procesos vitales de crecer, reproducirse, o mantener su estado físico. Por ejemplo, ha sido determinado que el trematodo del género *Uvulifer*, causante de la enfermedad del punto negro en peces de agua dulce, influyó negativamente en el desarrollo embrionario del pez vivíparo *Poeciliopsis retropinna*. Las hembras con un mayor número de parásitos, produjeron embriones más pequeños y con una peor condición corporal al momento del nacimiento en comparación con las hembras con menor carga parasitaria. Los autores de este trabajo atribuyen estos efectos en la progenie al costo producido por la respuesta inmune de las madres para contener a los parásitos. Es decir, las madres asignaron una mayor cantidad de recursos fisiológicos y energéticos al combate de la infección, en detrimento de los recursos asignados para la gestación. De este modo, los parásitos pueden incidir negativamente en el desempeño general de sus hospederos, comprometiendo la condición corporal, o la asignación de recursos para la reproducción (Hagmayer et al., 2020). En este contexto, nosotros demostramos que las metacercarias fisiológicamente activas del trematodo *Clinostomum sp.* pueden generar desbalances entre la inversión de recursos destinados a la reproducción y los empleados para mantener la condición corporal en machos del pez vivíparo *Poeciliopsis infans*. Los peces con mayor cantidad de metacercarias desarrollaron testículos más grandes, a costa de una condición corporal más precaria. Estos efectos negativos sobre la condición corporal de los hospederos pueden atribuirse a una mayor inversión reproductiva, generando costos energéticos que comprometen sus defensas frente a infecciones, permitiendo una mayor carga parasitaria (Domínguez-Castaneda et al., 2024).

Por otro lado, ha sido probado que la infección por helmintos puede influir negativamente en el desempeño de los peces, debido a deterioros físicos o mecánicos, asociados con el daño en los tejidos donde se alojan los parásitos, o con el daño que estos puedan ocasionar al migrar de un órgano a otro. Coleman (1993) determinó que la infección en el pez *Cyprinodon variegatus* producida por el trematodo *Ascocotyle pachycystis* en el corazón (bulbo arterioso), produjo hipertrofia del tejido cardiaco, bloqueando mecánicamente el flujo sanguíneo normal y limitando con ello el desempeño de sus actividades diarias. Estos parásitos infectan a los peces entrando por el epitelio branquial y migrando posteriormente al corazón a través del torrente sanguíneo. Esto tiene como consecuencia que los peces con mayor presencia de parásitos tengan dificultades para nadar, particularmente bajo condiciones limitantes, como temperaturas frías del agua durante el invierno (donde la sangre se vuelve más viscosa) o bajo concentraciones bajas de oxígeno. Esto no solo impide el desempeño normal de los peces, sino que también incrementa el riesgo de ser depredados. Esto es una consecuencia de la infección que es particularmente ventajosa para los parásitos que usan varios hospederos, ya que les facilita alcanzar un hospedero definitivo y, por lo tanto, puede ser considerado un rasgo adaptativo adquirido por coevolución. Existen suficientes evidencias al respecto, ya que muchos parásitos de peces suelen alojarse en las branquias, en los ojos o en el cerebro. Estos sitios de infección pueden proveer de nutrientes adecuados para los parásitos y los mantiene relativamente aislados del sistema inmunitario del hospedero, como mencionamos anteriormente. Adicionalmente, pueden ocasionar problemas de

respiración, visión o locomoción en los peces, facilitando a los depredadores alimentarse de ellos, lo que a su vez les permite a los parásitos completar su ciclo de vida en sus hospederos definitivos.

Por otro lado, la infección por helmintos puede modificar actividades como la alimentación de los peces. Hoy sabemos que algunos trematodos alojados en los ojos de algunos peces provocan la reducción en la distancia a la que los peces pueden reaccionar a una presa, perjudicando su capacidad para alimentarse y ocasionando que los peces deban dedicar mayor cantidad de tiempo para conseguir un número equivalente de presas que los peces sanos. También sabemos que algunos peces parasitados cambian su elección de alimentos, ya que en vez de alimentarse con presas grandes que aportan abundantes nutrientes, cambian a presas pequeñas que son energéticamente más fáciles de capturar y digerir cuando está parasitados. En este contexto, Giles (1987) demostró que los peces espinosos de tres púas *Gasterosteus aculeatus* infectados con el cestodo *Schistocephalus solidus* dedican significativamente más tiempo a la búsqueda de alimento cuando están parasitados, con el fin de compensar la demanda energética adicional provocada por los parásitos. Sin embargo, al dedicar más tiempo a esta actividad, los peces despliegan menor cantidad de comportamientos destinados a protegerlos de sus depredadores, facilitando también el acceso a un hospedero definitivo.

Finalmente, deseamos exponer un interesante caso en el que se muestran algunos efectos fisiológicos negativos que pueden ser mortales para los peces parasitados que se exponen a ciertas con-

diciones ambientales. Lemly y Gerald (1984) determinaron que los peces luna de branquias azules (*Lepomis macrochirus*) infectados con el trematodo *Uvulifer amblopliti* (enfermedad del punto negro), incrementan su tasa de mortalidad si se exponen a temperaturas frías. Estos investigadores establecieron que las temperaturas frías suprimen la alimentación en los peces, provocando que peces altamente infectados comenzaran el invierno en un inconveniente estado de agotamiento de lípidos, con una pobre condición corporal. El grado de deterioro corporal y la mortalidad asociada a los costos energéticos adicionales por la infección fueron directamente proporcionales a la cantidad de parásitos en los peces.

### Conclusión

Los peces usados como hospederos intermediarios por lo helmintos a menudo muestran algunos de los efectos físicos, fisiológicos o conductuales más dramáticos derivados de la infección; sin embargo, los efectos más impresionantes podrían ser (i) la manipulación del comportamiento, que con frecuencia favorece la depredación, facilitando el acceso al hospedero definitivo del parásito y (ii) la capacidad que tienen los parásitos para manipular el sistema inmunológico de sus hospederos, suprimiendo las respuestas que podrían resultar en su expulsión o muerte. En respuesta, los hospederos evolucionan un conjunto de mecanismos (e.g. linajes celulares específicos) dirigidos a eliminar a los parásitos o lidiar con sus efectos deletéreos. La complejidad de esta relación solo puede ser explicada por la interacción milenaria entre los parásitos y sus hospederos, los cuales emprenden una larga y dura carrera evolutiva por persistir, creando uno de los fenómenos bioló-

gicos más apasionantes y complejos de la naturaleza: la coevolución.

### Agradecimientos

Los autores agradecemos al Programa de Becas Posdoctorales de la UNAM, por la beca otorgada a Omar Domínguez Castanedo. Además, agradecemos al revisor anónimo que ayudó a mejorar este manuscrito y a las editoras por el cuidadoso manejo del mismo.

### Referencias

Coleman, C. F., Morphological and physiological consequences of parasites encysted in the bulbous arteriosus of an estuarine fish, the sheepshead minnow, *Cyprinodon variegatus*. *J. Parasitol*, 79[2], pp. 247-254, 1993.

Domínguez-Castanedo, O., Gaspar-Navarro, J. y Zúñiga-Vega J. J., Does the infestation by trematode parasites influence trade-offs between somatic condition and male reproductive traits in a viviparous fish? *J. Fish. Dis*, 0:e14038. <https://doi.org/10.1111/jfd.14038>, 2024.

Giles, N., Predation risk and reduced foraging activity in fish: experiments with parasitised and non-parasitised three-spined sticklebacks, *Gasterosteus aculeatus*. *J. Fish. Biol*, 31, pp. 37-44, 1987.

Hagmayer, A., Furness, I. A. y Pollux, A. B., Parasite infestation influences life history but not boldness behavior in placental live-bearing fish. *Oecologia*, 194, pp. 635-648, 2020.

Janzen, H. D., When is it coevolution? *Evolution*, 34[3], pp. 611-612, 1980.

Lemly, D. y Esch, G. W., Effects of the tre-




matode *Uvulifer ambloplitis* on juvenile Bluegill Sunfish, *Lepomis macrochirus*: ecological Implications. *J. Parasitol*, 70[4], pp. 475-492, 1984.

Stearns, C. S., *The evolution of life histories*. Oxford University Press, 1994.

Van Valen, L., A new evolutionary law. *Evolutionary Theory*, 1, pp. 1-30, 1973.



A photograph of a person riding a bicycle away from the camera on a city street during a heavy rain. The cyclist is wearing a blue helmet and dark clothing. The street is wet and reflective, with rain falling heavily around them. In the background, there are cars, including a silver Mercedes-Benz C180, and buildings with arched windows. A black lamppost is visible in the foreground on the right.

# Temperatura y Precipitación Pluvial en el área urbana y periferia de Morelia Michoacán, México

**Lic. Correa García Armando**  
*Facultad de Biología, Universidad Michoacana  
de San Nicolás de Hidalgo.*



## Resumen

La isla de calor urbano (UHI) ocurre cuando la temperatura de las áreas urbanas, es más alta que en los alrededores de la ciudad. Este fenómeno es evidente en ciudades de rápido crecimiento poblacional como León, ciudad de México y hace poco en Morelia se reportó éste exceso de calor. El efecto de la UHI es importante, porque puede ocasionar efectos negativos en la salud humana y podría estar relacionado con la mortalidad. Debido a esto, en este estudio se analizó la relación de la temperatura y precipitación pluvial entre dos sitios de monitoreo de Morelia; uno situado en el centro, y otro al suroeste fuera de la ciudad.

Entre otros resultados, se informa que la zona urbana es más cálida, que las inmediaciones de la ciudad, mientras que la precipitación pluvial es más abundante afuera, que en el centro de Morelia, lo cual puede atribuirse al continuo crecimiento de la ciudad y de la población. Para el año 2024 se espera un incremento de la temperatura a 19.9°C y de la lluvia a 286.47mm en el centro urbano de la ciudad con respecto al 2023.

**Palabras clave:** isla de calor, modelo de diagnóstico, bioclima.

## Abstract

The urban heat island (UHI) occurs when the temperature in urban areas is higher than in the surrounding areas of the city. This phenomenon is evident in cities with rapid population growth such as León, Mexico City, and this excess heat was recently reported in Morelia. The effect of UHI is important because it can cause negative effects on human health and could be related to mortality. Due to this, in this study the relationship of temperature and

rainfall between two monitoring sites in Morelia was analyzed; one located in the center, and another to the southwest outside the city.

Among other results, it is reported that the urban area is warmer than the surrounding area of the city, while rainfall is more abundant outside than in the center of Morelia, which can be attributed to the continuous growth of the city and the population. For the year 2024, an increase in temperature to 19.9°C and rainfall to 286.47 mm is expected in the urban center of the city compared to 2023.

**Keywords:** heat island, diagnostic model, bioclimate.

## Introducción

La climatología urbana es una ciencia que data de principios del siglo XIX, con los primeros estudios de (Howard, 1833 en Jáuregui, 1995), quién publicó el hallazgo de una masa de aire tibio sobre la capital de Inglaterra. Otros estudios realizados en Francia, Alemania y Estados Unidos han examinado las variaciones del clima derivado de la sustitución de superficies naturales por elementos de tejido urbano (Renou, 1855; Kratzer, 1956; Duckworth y Sandberg, 1954 en Jáuregui, 1995). A partir de la década de los años 60' del siglo pasado abundaron los trabajos de climatología urbana en las latitudes templadas, con base en el contraste térmico ciudad/campo conocido como isla de calor urbano (UHI). Luego surgieron los primeros estudios sobre el clima urbano en las ciudades tropicales, como resultado del rápido crecimiento de las áreas urbanas en los países tropicales en desarrollo (Bahl y Padmanabhamurty, 1979; Sham, 1973; Jáuregui, 1971 en Jáuregui, 1995); pero también, podría atribuir-



se a cambios en la cobertura del suelo por las actividades humanas (Palme, 2021).

El efecto de la UHI es importante porque aunado a la radiación solar tanto de paredes como de pavimentos en los meses cálidos da por resultado mayor molestia ambiental como sudoración, escalofrío, estado de ánimo, etc., por ello Jáuregui, (1995) infirió hace tiempo como benigno el bioclima de la ciudad de México. En la actualidad, se sabe puede ocasionar efectos negativos en la salud humana y podría estar relacionado con la mortalidad (de Schrijver *et al.*, 2021). También el proceso de urbanización reduce las fuentes naturales de vapor de agua, pero al mismo tiempo la ciudad produce vapores derivados de los procesos de combustión por fuentes fijas y móviles (Jáuregui, 1995) por ejemplo Carlón-Allende y Mendoza, (2007) analizaron los registros de la temperatura y precipitación del periodo 1947-2005 y 1947-2004 respectivamente, de las estaciones situadas en la llanura de la cuenca del Cuitzeo como son Cuitzeo, Cuitzillo Grande y Morelia (centro), entre las cuales Morelia presentó las temperaturas más altas y lluvias más bajas, lo cual comentan los autores, podría atribuirse al gran desarrollo urbano.

Análogamente, del periodo 2013-2021 (Correa-García, 2022) reportó que la temperatura en el área urbana es más cálida que en las afueras de Morelia y la época de lluvias, es más copiosa en los alrededores, que en el área urbana de dicha ciudad. Debido a esto, en este trabajo se revisan los parámetros meteorológicos temperatura (TEMP), humedad relativa (HR), radiación solar (RS), precipitación pluvial (RAIN), velocidad (WS) y dirección del viento (WD) registradas en 2 estaciones de monitoreo atmosférico, 1 instalada en el

área urbana y otra en la periferia de la capital del estado de Michoacán del periodo 2022-2023. Lo anterior tiene como propósito evaluar la relación entre las variables ya mencionadas, y generar un modelo de diagnóstico que permita determinar los valores futuros de la temperatura y precipitación pluvial a corto plazo, el cual podría ser de utilidad como guía de referencia, en la elaboración de Políticas de Protección al Medio Ambiente Urbano de Morelia.

### Metodología

Los datos de los años 2022-2023 de las variables meteorológicas citadas previamente, corresponden a las casetas de monitoreo atmosférico situadas en; una en Palacio Municipal de Morelia (PMN) (**Figura, 1A**), y otra que está ubicada en las instalaciones de la Escuela Nacional de Estudios Superiores de la Universidad Nacional Autónoma de México (ENES-UNAM) sede Morelia (**Figura, 1B**). La información para el sitio de PMN, se obtuvo del Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA) adscrita al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) del Gobierno de México.

Disponible en <https://www.sinaica.inecc.gob.mx>, y para la estación ENES-UNAM, los datos se adquirieron de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la UNAM (RUOA) disponible en <https://www.ruoa.unam.mx>.

El área de estudio es el centro urbano de Morelia (Figura, 1), la información se arregló en una hoja de cálculo por mes y día del año. En seguida, se validó la información bajo el criterio del 75% de suficiencia diaria; es decir, los días que reunieron 18 de 24 registros por día. De esta forma se determinó el tamaño de la muestra "X"



Imagen (A)



Imagen (B)

**Figura 1.** Estaciones de monitoreo atmosférico en Morelia, Michoacán. En A) Palacio Municipal del centro de la ciudad, y B) ENES-UNAM al suroeste en las inmediaciones de Morelia.

con respecto a la muestra esperada del 100% para el año y mes de 8,760 y 744 datos respectivamente (Tabla, 1).

Equipo de monitoreo automático				
Datos		Malo	Regular	Bueno
Válidos	Horarios	Insuficiente	Suficiente	Acceptable
		<50%	≥50%; <75%	≥75%
Año	No bisiesto	0 a 4,300	4,340 a 6,520	6,530 a 8,760
Año	Bisiesto	0 a 4,340	4,360 a 6,540	6,570 a 8,784
Mes/día	31	0 a 365	369 a 550	560 a 744
Mes/día	30	0 a 350	360 a 535	540 a 720
Mes/día	28	0 a 330	335 a 500	505 a 672
Mes/día	Bisiesto			
	29	0 a 340	345 a 515	520 a 696

**Tabla 1.** Categorías de desempeño anual de una estación de monitoreo atmosférico.

Fuente: Reproducido de (INE, S/F) y modificada en este estudio por el autor.

Después, se realizaron análisis de correlación y regresión para examinar la relación entre las variables meteorológicas ya mencionadas, y de esta forma proponer un modelo de regresión lineal para medir la temperatura y cantidad de lluvia con un año de antelación. Enseguida, se determinó el coeficiente de correlación de Pearson, que es un índice adimensional localizado entre -1,0 y 1,0, el cual refleja el grado de dependencia lineal entre

dos conjuntos de datos. Su fórmula se escribe como.

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \dots\dots\dots (1)$$

Por otra parte, si X e Y son dos variables en cuestión, un diagrama de dispersión muestra la localización de los puntos (X, Y) sobre un sistema rectangular de coordenadas. Si todos los puntos del diagrama parecen estar en una recta, la correlación es lineal entre las variables; sin embargo, aunque las variables estén relacionadas, no siempre se extienden sobre una línea recta y se dice que es una relación no lineal. Una línea recta, es el tipo más sencillo de una curva de ajuste (Spiegel, 1991) su ecuación puede escribirse:

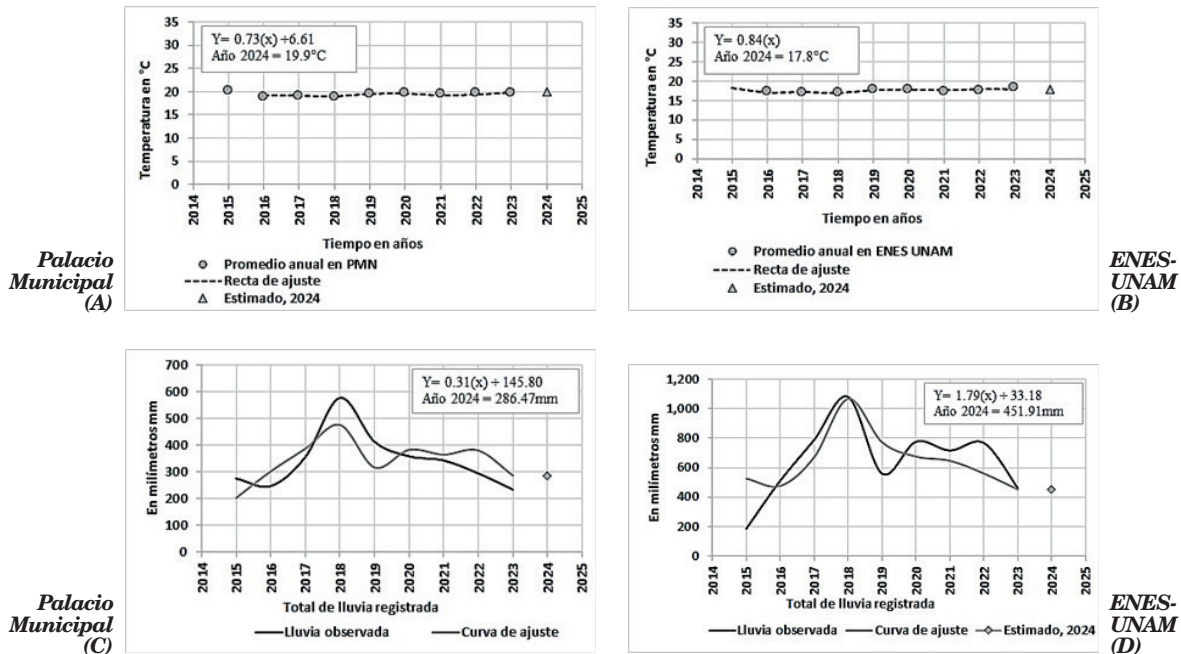
$$Y = a_0 + a_1 X \dots\dots\dots \text{Ecuación (2)}$$

Dados cualesquiera dos puntos (X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>) y (X<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>) sobre la recta, se pueden determinar las constantes a<sub>0</sub> y a<sub>1</sub>. La ecuación así obtenida se puede expresar.

$$Y - Y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (X - X_1)$$

Donde

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$



**Figura 2.** Promedio anual de temperatura y total de precipitación pluvial registrada en Morelia, Michoacán. En A y C; B y D) centro y periferia de la ciudad respectivamente. Fuente: Del periodo 2015-2021 Reproducido de (Correa-García, 2022).

Se llama la pendiente de la recta y representa el cambio en Y dividido por el correspondiente cambio en X. Cuando la ecuación se escribe en la forma (2), la constante  $a_1$  es la pendiente m. La constante  $a_0$ , que es el valor de Y cuando X= 0, se nombra la Y-intersección. El software estadístico Infostat versión libre 2008 usado este estudio, tiene los módulos que efectúan el análisis mencionado anteriormente.

**Resultados**

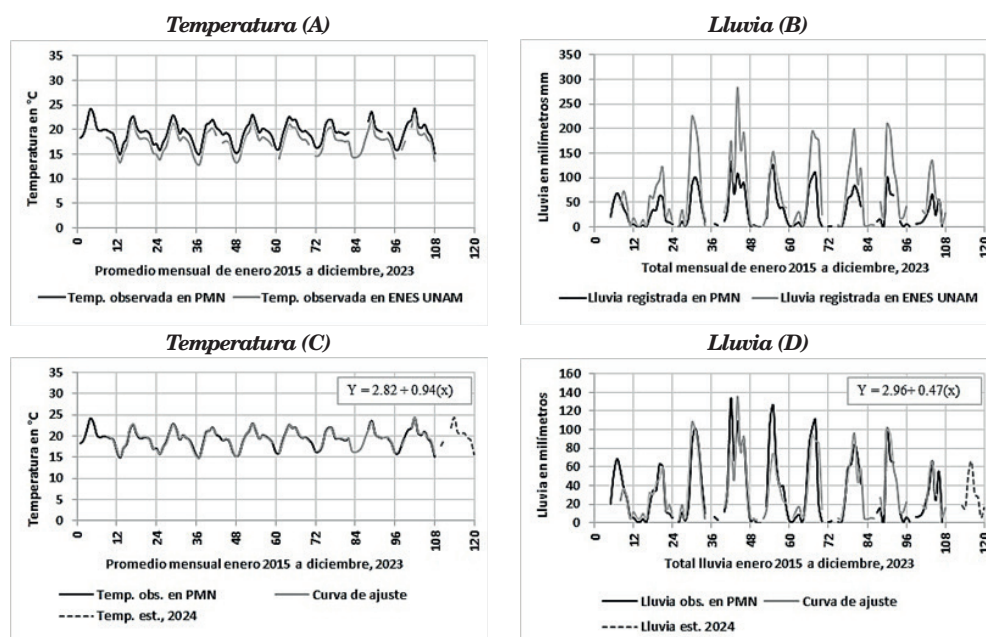
En términos generales el coeficiente de correlación de Pearson, fue negativo entre la lluvia y la temperatura en -0.50 y -0.64 en PMN y ENES-UNAM con p= 0.17 y p= 0.08 respectivamente, mientras que la relación entre la lluvia y humedad relativa fue débil cercana a cero, y no significativa en ambos sitios de monitoreo. Por otra parte la asociación entre la temperatura, humedad relativa y lluvia entre los sitios

de muestreo fue positiva en  $\pm 0.74$  (Tabla, 2). Con estos valores se plantearon los siguientes modelos de regresión

El primero, supone que la temperatura media anual en PMN es función de la temperatura registrada en la estación ENES-UNAM con factor de determinación  $R = 0.61$ ,  $R^2 = 0.55$  nivel de confianza  $p=0.0214$  y error estándar de  $0.24^\circ\text{C}$ . (Figura, 2A). A la inversa la temperatura de la ENES-UNAM ahora depende de la temperatura obtenida en PMN, siendo los valores de correlación similares al modelo propuesto primeramente, pero con un error estándar de  $0.27^\circ\text{C}$  (Figura, 2B).

Igualmente, el tercer modelo propone que la lluvia observada en PMN también depende de la precipitación pluvial registrada en la ENES-UNAM con coeficiente de correlación  $R = 0.55$ ,  $R^2 = 0.48$  nivel de confianza





**Figura 3.** Promedio mensual de la temperatura y total de precipitación pluvial registrada en Morelia, Michoacán. En A y B Sobre posición de la temperatura y lluvia en el centro y alrededor de Morelia; C y D) Modelo de regresión propuesto para el centro histórico de Morelia. Fuente: Del periodo 2015-2021 Reproducido de (Correa-García, 2022).

$p=0.0227$  y error estándar de 0.11mm (**Figura, 2C**). A la inversa, la lluvia en las afueras de la ciudad depende de la misma, registrada en el centro de Morelia (**Figura, 2D**). Así que, los modelos antes descritos indican que la temperatura en PMN subirá a 19.9°C y en la ENES UNAM bajará a 17.8°C respectivamente; mientras que la precipitación pluvial, subirá a 286.47mm y bajará a 451.91mm en PMN y ENES UNAM en 2024.

	1	2	3	4	5	6	
	Temp PMN	Hr PMN	Lluvia PMN	Temp ENES	Hr ENES	Lluvia ENES	
1	Temp PMN	1	0.49	0.17	0.02	0.45	0.09
2	Hr PMN	0.27	1	0.93	0.07	0.04	0.18
3	Lluvia PMN	-0.50	-0.03	1	0.19	0.28	0.02
4	Temp ENES	0.78	-0.66	-0.52	1	0.76	0.09
5	Hr ENES	-0.31	0.74	0.44	-0.13	1	0.55
6	Lluvia ENES	-0.60	-0.49	0.74	-0.64	0.25	1

**Tabla 2.** Matriz de correlación entre los parámetros meteorológicos registrados en dos sitios de monitoreo en Morelia, Michoacán.

Por otra parte, la (**Figura, 3**) presenta la temperatura media mensual y precipitación

pluvial total registrada en PMN, sobrepuesta con las mismas variables correspondientes al sitio ENES-UNAM; como se puede apreciar, el centro es más cálido que las inmediaciones de Morelia (**Figura, 3A**), pero la lluvia es más copiosa conforme se aleja del centro histórico de la ciudad (**Figura, 3B**).

Asimismo, el quinto modelo propuesto (**Figura, 3C**) confirma otra vez la dependencia de la temperatura media mensual registrada en PMN de los valores observados en la estación ENES UNAM, con factor de correlación  $R = 0.99$ ,  $R^2 = 0.99$  nivel de confianza  $p < 0.0001$  y error estándar de 0.01°C (**Figura, 3C**), mientras que la precipitación pluvial del centro urbano, también depende de la lluvia registrada en la estación ENES UNAM, con factor de correlación  $R = 0.79$ ,  $R^2 = 0.79$ , nivel de confianza  $p < 0.0001$  y error estándar de 0.03mm (**Figura, 3D**).

A la inversa, el séptimo y octavo modelo para la temperatura y lluvia mensual registrada en la ENES UNAM dependen ahora, de los valores obtenidos en PMN (**Figura, 4A y B**), siendo los factores de correlación parecidos a los descritos previamente para PMN (**Figura, 3C y D**), lo cual parece razonable, debido a la distancia, el entorno físico y las actividades que se realizan entre el centro histórico y los alrededores de Morelia.

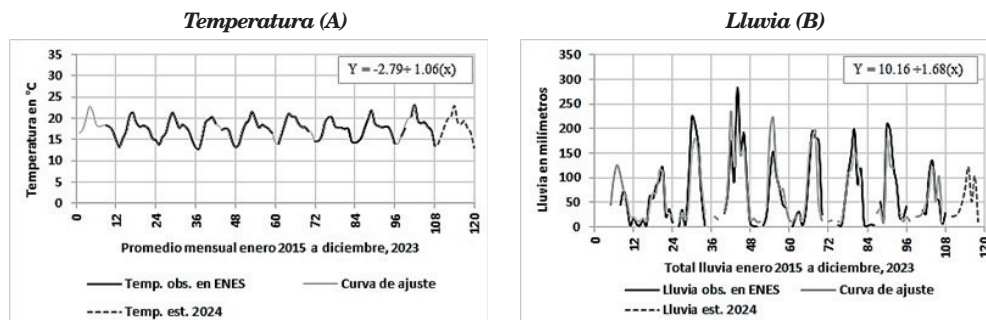
Estas últimas descripciones, muestran que la temperatura media aumentará en la mayoría de los meses del año 2024, en un rango de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ , sobre todo a partir del segundo semestre en Palacio Municipal, mientras que en la ENES-UNAM; el calor bajará, en la segunda mitad del año con un rango parecido al de PMN. Sin embargo, conviene mencionar, que las temperaturas de enero  $14.6^\circ\text{C}$  y abril  $20.0^\circ\text{C}$  señaladas en negrita, de la ENES UNAM corresponden al año 2022 por falta de datos en 2023 (**Tabla, 3**), y a partir de estas cifras, se estimaron los valores de PMN, también indicados en negrita, aplicando la ecuación anotada en la (**Figura, 3C**).

Asimismo, en la estación de PMN la precipitación pluvial subirá en los primeros 5 meses del año; julio, septiembre y diciem-

bre podrían ser los meses más lluviosos con respecto al 2023; mientras que en la ENES UNAM, la lluvia aumentará en el primer trimestre, junio y noviembre del 2024; octubre, podría ser el mes más lluvioso del año (**Tabla, 3**). Igualmente, los valores de la ENES UNAM señalados en negrita de enero, febrero y abril  $4.7\text{mm}$ ,  $3.7\text{mm}$  y  $51.10\text{mm}$  respectivamente, corresponden al año 2022 por falta de datos en 2023, o bien que en dichos meses no se registró evento de lluvia (**Tabla, 3**), mientras que los meses de enero y diciembre, también señalados en negritas  $0.6\text{mm}$  y  $0.61\text{mm}$  en el sitio PMN corresponden al año 2020 y 2022 por falta de información en 2023, o bien que en dichos meses no se registró evento de lluvia y a partir de estas cifras se estimaron los valores de PMN y el sitio de la ENES UNAM, también indicados en negrita, aplicando la ecuación anotada en la (**Figura, 3D**) y (**Figura, 4B**).

### Evaluación de los modelos

La (**Tabla, 3**) presenta también en la última columna, el valor residual (valor estimado-valor observado); el tono gris indica que la tendencia se cumplió, mientras que el tono gris oscuro significa que la información fue insuficiente para evaluar las predicciones de los modelos, con los valores observados hasta el mes de abril del



**Figura 4.** Promedio mensual de la temperatura y total de precipitación pluvial registrada en Morelia, Michoacán. En A y B) Modelo de regresión propuesto para los alrededores de Morelia.

Fuente: Del periodo 2015-2021 Reproducido de (Correa-García, 2022).

Estación PMN	Mes del Año	Temperatura observada	Temperatura estimada	Límite de -95% CL	confianza 95% CL	Temperatura observada	Valor residual	Estación ENES UNAM	Mes del Año	Temperatura observada	Temperatura estimada	Límite de -95% CL	confianza 95% CL	Temperatura observada	Valor residual
		Año 2023	Año 2024	Año 2024		Año 2023	Año 2024			Año 2024					
A	1	15.9	16.5			16.6	-0.1	B	1	14.6	14.0	13.9	14.1	14.9	-0.9
	2	17.8	17.7	17.7	17.8	18.2	-0.5		2	15.9	16.0	16.0	16.1	16.0	0.0
	3	19.9	19.3	19.3	19.4	20.5	-1.2		3	17.6	18.2	18.2	18.3	18.6	-0.3
	4	21.5	21.6			22.8	-1.2		4	20.0	19.9	19.9	20.0	21.5	-1.6
	5	22.0	22.0	22.0	22.1				5	20.5	20.5	20.4	20.5		
	6	24.3	24.5	24.3	24.6				6	23.1	22.9	22.8	23.0		
	7	20.7	20.9	20.8	21.0				7	19.3	19.1	19.0	19.1		
	8	20.3	20.5	20.5	20.6				8	18.9	18.7	18.6	18.7		
	9	21.0	20.7	20.7	20.8				9	19.1	19.4	19.3	19.5		
	10	19.4	19.6	19.5	19.6				10	17.9	17.7	17.7	17.8		
	11	18.4	18.9	18.9	19.0				11	17.2	16.7	16.6	16.7		
	12	15.1	15.6	15.5	15.7				12	13.6	13.2	13.1	13.3		

Estación PMN	Mes del Año	Lluvia observada	Lluvia estimada	Límite de -95% CL	confianza 95% CL	Lluvia observada	Valor residual	Estación ENES UNAM	Mes del Año	Lluvia observada	Lluvia estimada	Límite de -95% CL	confianza 95% CL	Lluvia observada	Valor residual
		Año 2023	Año 2024	Año 2024		Año 2023	Año 2024			Año 2024					
A	1	1.3	5.2					B	1	4.7	12.35	2.44	22.26	1	11.35
	2	0.6	4.7						2	3.7	11.20			20.1	-8.90
	3	6.30	7.55	2.51	12.60				3	9.80	20.76	11.51	30.01		
	4	7.20	27.0						4	51.10	22.28	13.14	31.41	0.6	21.68
	5	11.40	18.56	14.27	22.85				5	33.30	29.34	20.70	37.98		
	6	22.40	15.52	11.04	19.99				6	26.80	47.84	40.22	55.46		
	7	39.60	53.64	49.38	57.90				7	108.20	76.78	69.64	83.91		
	8	66.10	65.86	60.77	70.95				8	134.30	121.35	112.15	130.55		
	9	24.20	31.11	27.31	34.91				9	60.10	50.87	43.37	58.37		
	10	55.10	27.88	24.00	31.76				10	53.20	102.85	94.85	110.85		
	11	0.20	6.06	0.89	11.22				11	6.60	10.50	0.44	20.56		
	12	0.61	16.17	11.74	20.61				12	28.20	11.2				

Tabla 3. Resumen de los valores estimados para el año 2024, de la temperatura media y total de precipitación pluvial mensual en 2 sitios de monitoreo de la ciudad de Morelia, Michoacán.

Nota: las cifras en tono gris claro, significa que el valor predicho se cumplió; el tono gris oscuro, significa muestreo insuficiente <50% (no se toma en cuenta para evaluar tendencia).

2024. Para la temperatura de los 4 valores pronosticados en PMN y la ENES-UNAM se cumplieron 2 y fallaron 2; sin embargo, el valor observado de 18.6°C en marzo 2024 en la ENES UNAM, resultó de un muestreo por debajo del 50%, y aun así la temperatura estimada se cumplió. Con relación a la precipitación pluvial, también en la ENES UNAM se cumplieron 2 de 4 posibilidades, mientras que en el sitio de Palacio Municipal no se halló información válida en el primer cuatrimestre del año debido a fallas del pluviómetro que cuantifica la lluvia, por ejemplo del 01 al 10 de enero se registró el valor de 17.99mm y 18mm repetidamente.

Del 16 al 29 de febrero, del 01 al 13 de marzo y recientemente del 22 al 24 de abril del 2024 según la información recolectada y publicada por la plataforma SI-NAICA disponible en <https://www.sinaica.inecc.gob.mx>.

### Discusión

La (Tabla, 4) presenta la temperatura media mensual y anual de 2015 hasta abril 2024, registrada en los 2 sitios de monitoreo de Morelia; como se puede ver, existe una diferencia de ±1.5°C entre el centro y la periferia de la ciudad. En el centro el año más cálido y frío, fue el 2015 y 2018 respectivamente, con valor mínimo de 2.7°C en 2016 y máximo de 35°C en 2018; sin embargo, la temperatura media más alta de 24.2°C se registró en abril 2015 y junio 2023. La temperatura más fría ocurrió en enero 2016 con 14.9°C; nótese, que el primer cuatrimestre del 2024 mostró un fuerte incremento con respecto al 2023, de los cuales las estimaciones presentadas en este estudio se aproximaron bien con los valores observados de enero y abril 2024 en el sitio PMN.

En la periferia de Morelia, el año más cálido y frío, fue el 2023 y 2018 respec-



Año	Temperatura													Promedio	Valor mínimo	Valor máximo
	Meses del año															
Estación Palacio Municipal																
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Año			
1	2015	18.3	19.1	21.5	24.2	23.1	20.3	19.7	20.0	19.9	19.5	19.1	16.6	20.1	8.1	33.8
2	2016	14.9	17.1	18.2	21.6	22.7	20.5	19.5	19.6	19.7	19.1	17	17.1	18.9	2.7	32.5
3	2017	15.8	17.4	18.7	21.1	22.9	21.6	19.2	20.2	19.6	19.0	17.4	15.5	19.0	4.3	33.6
4	2018	15.0	17.9	20.9	21.3	22	20.4	19.9	19.0	19.3	18.8	16.4	15.2	18.8	3.3	35.0
5	2019	15.8	18.5	20.3	21.2	23	21.3	19.4	20.2	19.9	19.4	18.4	16.2	19.5	6.5	32.3
6	2020	16.0	18.7	20.8	22.6	21.9	22.0	20.3	19.6	19.7	19.1	18.2	16.4	19.7	5.9	32.4
7	2021	16.4	17.6	20.9	22	21.8	19.5	19.5	19.3	19.0	19.4			19.5	4.3	32.0
8	2022				21.7	23.6	20.5	19.8	19.5		19.3	18.3	16.1	19.8	6.6	33.7
9	2023	15.9	17.8	19.9	21.5	22.0	24.3	20.7	20.3	21.0	19.4	18.4	15.1	19.7	5.0	34.9
10	2024	16.6	18.2	20.5	22.8										11.3	32.8
± % aumento	-9	-5	-5	-6	-5	20	5	2	6	-1	-4	-9	-2			
± °C aumento	-1.7	-0.9	-1.0	-1.4	-1.1	4.0	1.0	0.3	1.1	-0.1	-0.7	-1.5	-0.4			

Año	Temperatura													Promedio	Valor mínimo	Valor máximo
	Meses del año															
Estación ENES UNAM																
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Año			
1	2015								18.4	18.0	17.2	14.9				
2	2016	13.3	15.2	16.8	20.2	21.4	19.2	18.1	18.2	18.1	17.3	15.2	14.9	17.3	1.1	31.6
3	2017	13.9	15.6	16.6	19.4	21.3	19.9	17.8	18.5	18.0	17.0	14.8	13.2	17.2	1.2	31.0
4	2018	12.9	15.7	19.1	19.8	20.3	18.8		17.3	17.7	17.2	14.6	13.2	17.0	0.9	33.2
5	2019	13.9	16.6	18.7	19.6	21.5	19.8	17.8	18.5	18.1	17.6	16.6	14.2	17.8	4.5	30.3
6	2020	14.1	16.6	19.1	21.1	20.4	20.4	18.8	18.0	17.9	17.0		14.6	17.9	3.0	30.1
7	2021	14.7	15.9	19.1	20.2	20.2	18.1	17.8	17.8	17.5	17.6	14.6	14.3	17.3	2.3	30.1
8	2022	14.6	15.6	17.9	20.0	21.8	18.8	18.2	17.9	18.0	18.0	16.6	14.0	17.6	4.1	31.5
9	2023		15.9	17.6		20.5	23.1	19.3	18.9	19.1	17.9	17.2	13.6	18.3	3.5	32.7
10	2024	14.9	16.0	18.6	21.5										9.0	31.3
± % aumento	13	5	5	6	-4	21	7	3	4	0	0	-9	6			
± °C aumento	1.7	0.8	0.8	1.3	-0.9	4.0	1.2	0.6	0.8	-0.1	0.0	-1.3	1.0			

**Tabla 4.** Resumen del promedio mensual y por año de la temperatura en °C en 2 sitios de monitoreo de la ciudad de Morelia, Michoacán.

Fuente: Del periodo 2015-2021 Reproducido de (Correa-García, 2022).

Nota: las cifras en tono gris claro, significa que el muestreo fue ≥50% y <75%; el tono gris oscuro, significa muestreo insuficiente <50% (no se toma en cuenta para evaluar tendencia).

tivamente, con valor mínimo de 0.9°C en 2018 y máximo de 33.2°C también en 2018; sin embargo, la temperatura media más alta de 21.5°C se registró en abril 2024, mayo 2022 con 21.8°C y junio 2023 con 23.1°C. La temperatura más fría ocurrió en enero 2018 con 12.9°C; nótese, que el primer cuatrimestre del 2024 mostró también fuerte incremento con respecto al 2023 y con relación a enero y abril 2022, de los cuales las estimaciones se aproximaron bien con los valores observados de febrero y marzo 2024.

Por otra parte, la (Tabla, 5) presenta la precipitación pluvial mensual y anual de 2015 hasta abril 2024, registrada en los 2 sitios de monitoreo de Morelia; como se puede ver, existe una diferencia grande entre el centro y la periferia de la ciu-

dad. En el centro el año más lluvioso fue el 2018 y 2023 con menos lluvias; desde el verano 2018 al presente, se denota una caída prolongada de la temporada de lluvias. Además, al inicio del otoño e invierno y primavera se ha presentado un incremento de la lluvia, pero sin alcanzar los registros observados del 2018, y los valores estimados al cuatrimestre 2024 no fue posible evaluarlos por falta de datos en el centro de la ciudad. En el caso de la ENES-UNAM, el año 2018 también fue de mayor precipitación pluvial y 2015 con menos lluvia, y a partir del verano 2018 ha bajado notablemente la lluvia; al final del verano, e inicio de otoño e invierno y la primavera se observa un incremento de la lluvia, pero sin alcanzar los valores registrados en 2018. Pese a esto, la lluvia registrada del 2023 mantiene la tendencia

Año	Precipitación pluvial												Cantidad Año	Dias con lluvia	
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre			
1	2015					20.7	54.1	68.6	56.2	37.6	25.5	6.5	5.9	275.1	79
2	2016	1.6	0.9	4.10	0.9	19.1	34.6	34.8	62.8	60.1	12.6	10	5.7	247.2	117
3	2017		0.7	11.3	2.3	19.9	85.5	101.2	82.1	43	10.1			356.1	96
4	2018	6.3	3.2		12.2	37.4	133.5	67.3	109.2	80.1	89.3	36.8	2.2	577.5	153
5	2019	4.1	0.1	0.20		17.5	106.8	126	61.2	38.9	39.7	16.8	1.9	413.2	99
6	2020	1.4	6	8.9	1.2	25	81.7	101.2	110.2	20.2	1.8		1.0	358.6	96
7	2021	1.8		0.7	0.3	22.5	57.9	63.4	83.9	70.2	42.1			342.8	106
8	2022			11.0	15.5	0.2	99.5	68.4	64.8	16.5	11.5	0.9	6.1	294.4	83
9	2023	1.3		6.30	7.2	11.4	22.4	39.6	66.1	24.2	55.1	0.2		233.8	87
10	2024														
	± % aumento	-19	567	54	700	-45	-59	-42	18	-36	116	-97	3	-15	
	± mm aumento	-0.3	5.1	2.20	6.3	-9.3	-31.7	-29	9.9	-13.4	29.6	-6.3	0.2	-41.3	

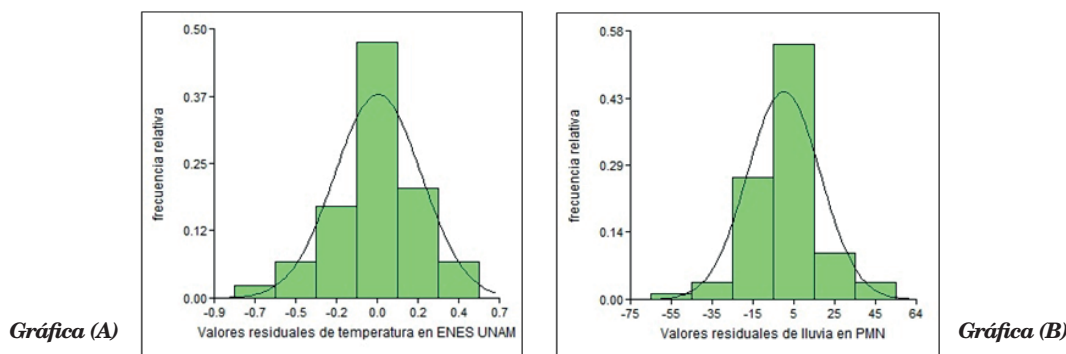
Año	Precipitación pluvial												Cantidad Año	Dias con lluvia	
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre			
1	2015								45.2	72.5	46.5	3.2	18.4	185.8	41
2	2016	5.7	2.8	14.6	3.3	62.7	57.9	83.0	95.2	119.7	21.4	36.3	9.1	511.7	140
3	2017		0.9	34.6	4.7	93.9	223.5	207.0	162.0	59.5	3.2			789.3	119
4	2018	0.7			28.5	68.1	174.7	92.9	282.2	156.9	190.4	80.1	6.8	1081.3	153
5	2019	1.9	0.4		3.5	25.6	105.4	152.9	105.8	76.2	45.5	38.5	3.9	559.6	108
6	2020	1.4	20.6	30.2	3.2	30.9	114.5	193.7	181.5	175.0	24.8		0.1	775.9	106
7	2021			4.1	2.7	48.2	105.5	147.1	197.6	87.6	117.2	4.2	2.2	716.4	125
8	2022	4.7	3.7		51.1	17.7	209.0	195.6	122.1	86.1	17.7	18.7	41.4	767.8	117
9	2023			9.8		33.3	26.8	108.2	134.3	60.1	53.2	6.6	28.2	460.5	97
10	2024	1.0	20.1		0.6										
	± % aumento	-82	618	-33	-82	-47	-54	30	197	-17	14	106	53	148	
	± mm aumento	-4.7	17.3	-4.8	-2.7	-29.4	-31.1	25.2	89.1	-12.4	6.7	3.4	9.8	274.7	

**Tabla 5.** Resumen de cantidad mensual y anual de la precipitación pluvial en mm en 2 sitios de monitoreo de la ciudad de Morelia, Michoacán. Fuente: Del periodo 2015-2021 Reproducido de (Correa-García, 2022) y adaptada en el presente estudio.

al aumento en las afueras de la ciudad, y los pronósticos del primer cuatrimestre 2024 mostraron una sobreestimación y subestimación con respecto de los valores observados en febrero y abril 2024.

Estos resultados pueden considerarse aceptables, porque las predicciones no están exentas de fallar a causa de fac-

tores de mantenimiento y calibración de los equipos de medición; sin embargo los valores residuales del modelo para la temperatura y lluvia (**Figura, 3C; Figura, 4B**), se aproximaron bien al principio de normalidad (**Figura, 5**). Los otros modelos no se presentan en ningún apartado por lo amplio y extenso del presente estudio.



**Figura 5.** Histograma de los valores residuales obtenidos del modelo de temperatura y precipitación pluvial mensual. En A) estación de monitoreo de la ENES UNAM y B) Palacio Municipal de Morelia.

Año- mes	Año más frío			Año más caluroso			Año con menos lluvia			Año con mas lluvia		
	INEGI 1981	PMN 2018	ENES UNAM 2018	INEGI 1997	PMN 2015	ENESUNAM 2023	INEGI 1979	PMN 2023	ENES UNAM 2023	INEGI 1976	PMN 2018	ENES UNAM 2018
1 Enero	12.3	15	12.9	15.9	18.3		0	1.3		0	6.3	0.7
2 Febrero	14.8	17.9	15.7	17.5	19.1	15.9	29			0.7	3.2	
3 Marzo	17.3	20.9	19.1	20.4	21.5	17.6	0	6.3	9.8	22.1		
4 Abril	20.2	21.3	19.8	20.5	24.2		0	7.2		7	12.2	28.5
5 Mayo	20.5	22	20.3	21.4	23.1	20.5	9.2	11.4	33.3	35	37.4	68.1
6 Junio	19.6	20.4	18.8	22.9	20.3	23.1	3.2	22.4	26.8	200	133.5	174.7
7 Julio	16.5	19.9		21.4	19.7	19.3	184.7	39.6	108.2	270.4	67.3	92.9
8 Agosto	18.3	19	17.3	21.5	20	18.9	94.2	66.1	134.3	147.9	109.2	282.2
9 Septiembre	17	19.3	17.7	21.5	19.9	19.1	127.1	24.2	60.1	165.1	80.1	156.9
10 Octubre	17	18.8	17.2	19.6	19.5	17.9	0	55.1	53.2	171.6	89.3	190.4
11 Noviembre	15.4	16.4	14.6	20	19.1	17.2	1.4	0.2	6.6	35.5	36.8	80.1
12 Diciembre	13.8	15.2	13.2	16.1	16.6	13.6	38.4		28.2	4.7	2.2	6.8
Núm. datos	12	12	11				12	10	9	12	11	10
Promedio	16.9	18.8	17.0	19.9	20.1	18.3	487.2	233.8	460.5	1060	577.5	1081.3

**Tabla 6.** Resumen comparativo de la temperatura y precipitación pluvial en °C y mm registrada en 2 sitios de monitoreo de la ciudad de Morelia, Michoacán. Fuente para la ciudad de Morelia por (INEGI, 2012, 2016; 2021).

Por otra parte, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2012, 2016; 2021) reporta que los años más fríos y cálidos en Morelia fueron 1981 y 1997 respectivamente (**Tabla, 6**); esta información, se aproxima bien con el promedio observado en 2018 de la ENES-UNAM (cifras en tono gris); esto significa que 2018 fue tan frío como 1981, lo que indica que esta área semirural apartada de Morelia, todavía tiene un ambiente natural saludable. Contario a esto, el promedio registrado en PMN en 2018 fue diferente lo cual podría ser la evidencia de que la temperatura del centro es más alta (1.9°C) que en 1981 (hace 42 años) y actualmente 1.8°C más cálida que en la ENES-UNAM.

Asimismo, el año 1997 se aproximó bien con el promedio observado del 2015 en PMN, lo que significa que el año 2015 podría ser ligeramente el segundo año más caluroso que 1997, al menos en el centro de la ciudad. Esta última descripción, podría confirmarse con los reportes de (Correa-García, 2022) quien analizó, la temperatura entre 4 sitios de monitoreo de Morelia; los resultados mostraron que

en el sitio PMN, la temperatura fue más alta (19.5°C), que en Laboratorio Estatal de Salud (19.0°C), Ciudad Universitaria (18.9°C) y la ENES-UNAM (17.7°C) en el año 2017.

Por otra parte, 2023 podría considerarse el año con menos precipitación pluvial en PMN, con respecto del reportado para Morelia en 1979 por (INEGI, 2016; 2021); sin embargo para el sitio ENES-UNAM la cantidad de lluvia fue sutilmente parecida (**Tabla, 6**), mientras que la lluvia más abundante se registró en 1976 (INEGI, 2012, 2016; 2021) y fue ligeramente superada en el año 2018 en la ENES-UNAM. Aun cuando en PMN también se registró la mayor cantidad de lluvia en 2018, hoy en día en el centro histórico de Morelia la lluvia ha disminuido (**Tabla, 6**). Así que, las diferencias entre la temperatura y época de lluvias, observadas entre el centro y la periferia de la ciudad podrían atribuirse al efecto del crecimiento urbano; el cual en **1970** pasó de **1,377** Hectáreas (Has) a **12,000** Has en el **2004** (Vieyra y Larrazábal, 2014), mientras que la población en **1970** fue de **218,083** Habitantes (Hab),



en **2020** alcanzó la cifra de **825,585** Hab., (Correa-García, 2020; 2022). Además, de un parque vehicular de **23,736** unidades que había en **1980** a **548,414** vehículos de motor registrados para Morelia en el año 2017 según informó el (INEGI, 2019) disponible en <https://www.inegi.gob.mx>., mientras que para la ENES-UNAM, podría atribuirse a su entorno semirural con una amplia cobertura vegetal y arbórea.

### Conclusiones

La temperatura del centro urbano de la ciudad de Morelia, es más cálida, que la registrada unos 15 kilómetros, al suroeste de la capital del estado de Michoacán. Esta diferencia es de  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ , mientras que la temporada de lluvias es más abundante en los alrededores, que en el centro de Morelia.

Los modelos propuestos en este estudio, sugieren que la temperatura y precipitación pluvial se manifiestan de diferente modo e intensidad, por causa probable del crecimiento de la mancha urbana, incremento poblacional y del parque vehicular, así como las diversas actividades que se realizan en la ciudad de Morelia. Por lo que se recomienda, a las autoridades encargadas del tema fortalecer la política de limitaciones al crecimiento urbano de Morelia.

La evaluación de los modelos para la temperatura, mostró un fuerte incremento durante el primer cuatrimestre del 2024 en ambos sitios de monitoreo, siendo mayor en el centro de Morelia; el mes de abril, fue el segundo año más caluroso con  $22.8^{\circ}\text{C}$ , pero sin alcanzar el valor de  $24.2^{\circ}\text{C}$  registrado en el año 2015. En la ENES UNAM, el mes de abril 2024 fue el año más caluroso con  $21.5^{\circ}\text{C}$  desde que se iniciaron las mediciones en 2015. Pero habrá que espe-

rar que finalice el año 2024, para evaluar la eficiencia de los modelos propuestos.

La evaluación de los modelos para la precipitación pluvial, en el primer cuatrimestre del 2024 no se pudo efectuar en Palacio Municipal por fallas del pluviómetro. Se recomienda a las autoridades encargadas del tema, cerrar los canales de transmisión cuando los equipos fallan, evitando con esto la difusión de información errónea.

La comparación de la estación meteorológica de Morelia, con la información de las casetas de monitoreo atmosférico ubicada en Palacio Municipal latitud norte  $19^{\circ} 42' 06''$  longitud oeste  $101^{\circ} 11' 43''$  y ENES-UNAM latitud norte  $19^{\circ} 64' 93''$  longitud oeste  $101^{\circ} 22' 21''$  y una altitud de 1, 936 msnm, es válida porque se encuentran aproximadas en las coordenadas geográficas de latitud norte  $19^{\circ} 42' 08''$  longitud oeste  $101^{\circ} 11' 08''$  y una altitud de 1, 920 msnm.

En la ENES UNAM, el mes de febrero sobresalió con un incremento de 20.1mm, pero sin alcanzar la cantidad de lluvia de 20.6mm registrada en el año 2020, y abril se distinguió por una cantidad mínima de lluvia, desde que se iniciaron las mediciones en 2015. También habrá que esperar, que termine el año 2024 para evaluar la eficacia de los modelos de diagnóstico. En ambos sitios de monitoreo, el año más lluvioso fue 2018; desde entonces, la precipitación pluvial tiende a disminuir.

Los pronósticos presentados en este trabajo para el 2024, no están exentos de fallar, debido a los procesos de mantenimiento y calibración de los equipos, pero pueden considerarse como una guía de investigación a corto plazo.

### Bibliografía

Bahl, H. D. y B, Padmanabhamurty. (1979). Heat island studies at Delhi, *Mausam*, 30, pp. 119-122

Carlón-Allende, T. y Mendoza, E. M. (2007). Análisis hidrometeorológico de las estaciones de la cuenca del lago de Cuitzeo. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* ISSN 0188-4611, Núm. 63, 2007, pp. 56-76 DOI: 10.14350/ig.29910 · Source: DOAJ

Correa-García., A (2022). Contaminación atmosférica y meteorología en Morelia Michoacán, México. Una década evaluando la atmosfera urbana de la ciudad de Morelia. Publicado en noviembre 14, 2022. Pp. 228. Editorial Académica Española. Printed in the U.K. ISBN 978-620-2-25130-3

de Schrijver, E., Folly, C.L., Schneider, R., Royé, D., Franco, O.H., Gasparrini, A., Vicedo-Cabrera, A.M. (2021). A comparative analysis of the temperature-mortality risks using different weather datasets across heterogenous regions. *GeoHealth* 5, e2020GH000363. <https://doi.org/10.1029/2020GH000363>

Duckworth, F, y J, Sandberg. (1954). The effect of cities upon horizontal and vertical temperatura gradients, *Bull, Amer. Meteor. Soc.*; 35, pp. 198-207.

Howard, I. (1833). *Climate of London*. Harvey and Darton, Londres.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI, 2022). Aspectos Geográficos. Michoacán 2021. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México INEGI, 2022.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI, 2019). INEGI Estadísticas de vehículos de motor registrados en circulación. <https://www.inegi.gob.mx>. Fecha de consulta: 25/05/2019 23:28:56

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI, 2016). Anuario Estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo 2016 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México: INEGI, c2016. 723 p. ISBN 978-607-739-858-5. Impreso en México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI, 2012). Anuario Estadístico de Michoacán de Ocampo. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo- México: INEGI, c2013. 618p. ISSN 0188-8501. Impreso en México

Jáuregui, E. (1995). Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la ciudad de México debidas a la urbanización. *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 31, 1995. Departamento de Meteorología General Centro de Ciencias de la Atmosfera. UNAM.

Jáuregui, E. (1971). *Mesoclima de la ciudad de México*, Instituto de Geografía, UNAM, Imprenta Universitaria, 87 pp.

Kratzer, A. (1956). *Das Stadtklima*, F. Vieweg and Sohn, Braunschweig, 143 pp.

Palme, M. (2021). Urban Heat Island Studies in Hot and Humid Climates: A Review of the State of Art in Latin-America, in: Enteria, N., Santamouris, M., Eicker, U. (Eds.), *Urban Heat Island (UHI) Mitigation*, Springer Singapore, Singapore, pp. 123–141. [https://doi.org/10.1007/978-981-33-4050-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-33-4050-3_6)

- Instituto Nacional de Ecología (INE). (S/F). Primer catálogo. Estaciones de Monitoreo en México. Pp. 121
- Renou, E. (1855). Instructions meteorologiques, *Annuaire Soc. Meteorol de France*, 3, 1, pp. 73-160.
- Sham, S. (1973). The urban heat island of Kuala Lumpur, *Sains Malaysiana*, 2, pp. 53-64.
- Spiegel, Murray, R. (1991). Estadística. Segunda Edición. Editorial McGraw-Hill. Impreso en España.
- Vieyra, A. y Larrazábal, A. (2014). Urbanización, sociedad y ambiente. Experiencias en ciudades medias. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) de la UNAM, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC-Semarnat). Primera Edición 2014. Pp. 293. ISBN: 978-607-024403-2 Impreso y hecho en México. En <http://www.ciga.unam.mx/>, <http://www2.inecc.gob.mx/>



# ¿Cómo funcionan los submarinos nucleares?



**Dra. Alejandría D. Pérez-Valseca**  
*Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa,*  
*Área de Ingeniería en Recursos Energéticos*

**Dr. Gilberto Espinosa-Paredes**  
*Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa,*  
*Área de Ingeniería en Recursos Energéticos*

## Resumen

Desde el descubrimiento de la fisión nuclear y el control de la reacción en cadena, la energía nuclear ha estado en constante investigación y desarrollo. Sus aplicaciones incluyen los sistemas de generación eléctrica, aplicaciones médicas, agricultura y en sistemas de transporte, como los rompehielos y submarinos, por mencionar algunas. El uso de reactores nucleares en submarinos ha permitido aumentar su eficiencia, alcanzando mayor velocidad y aumentando el tiempo en el que pueden estar sumergidos. En este artículo se presenta de manera sencilla la historia y funcionamiento de los submarinos nucleares.

**Palabras clave:** Submarinos nucleares, fisión nuclear, tecnología nuclear, navíos nucleares.

## Abstract

Since the discovery of nuclear fission and control of the chain reaction, nuclear energy has been in constant research and development. Its applications include electrical generation systems, medical applications, agriculture, and transportation systems, such as icebreakers and submarines, to name a few. The use of nuclear reactors in submarines has allowed them to increase their efficiency, reaching higher speeds and increasing the time they can be submerged. This article presents the history and operation of nuclear submarines.

**Keywords:** Nuclear submarines, nuclear fission, nuclear technology, nuclear navy.

## ¿Cómo funcionan los submarinos nucleares?

Durante el último siglo, la civilización ha experimentado grandes avances tec-

nológicos, con la finalidad de explorar y entender nuevos entornos, tanto en la tierra como en el espacio exterior. Ejemplo de esto, es la exploración del Polo Norte y Polo Sur, las misiones en la Luna y Marte, así como la investigación constante en el subsuelo oceánico. Esta evolución tecnológica ha impulsado el estudio y aplicaciones de nuevas fuentes de energía, que proporcionen potencia suficiente por tiempos prolongados para poder realizar estas exploraciones. Una de estas fuentes de energía es la basada en la fisión nuclear. El estudio de la energía nuclear se desarrolló gracias a varias contribuciones, entre las que destacan el descubrimiento de la fisión nuclear por Lise Meitner y las aportaciones en el control de la reacción en cadena por Enrico Fermi.

La fisión nuclear es el proceso el cual inicia con un neutrón que colisiona a un átomo de material fisionable, por ejemplo U-235 y Pu-239, el neutrón es absorbido y el átomo es excitado, lo que ocasiona que se divida en dos fragmentos, liberando a su vez en promedio 2.5 neutrones y 200 MeV de energía, los neutrones liberados son de alta energía (alrededor de 2.5 MeV) y se conocen como neutrones rápidos. Para lograr la fisión de los átomos, la energía del neutrón absorbido depende de la naturaleza del átomo que va a ser fisionado, para el U-235 se requieren neutrones térmicos, los cuales tienen una energía menor de 0.025 eV y para el Pu-239 se requieren neutrones rápidos y térmicos (Smith, 2010).

Las diferentes tecnologías basadas en la fisión nuclear, incluyen los reactores nucleares para la generación de energía eléctrica con diferentes refrigerantes, incluyendo un combustible nuclear líquido, sistemas sate-



litales, así como sistemas de transporte marítimo, como los rompehielos y submarinos.

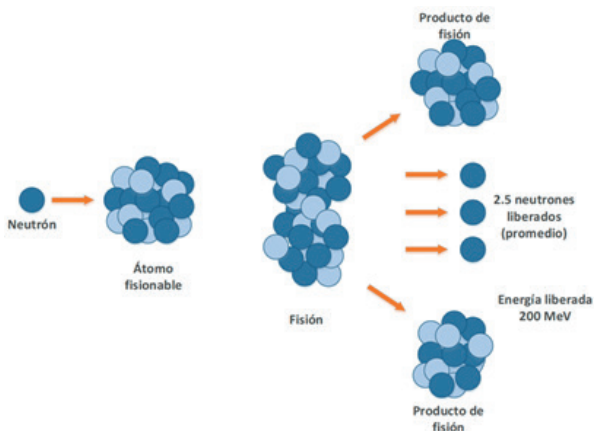


Figura 1. Reacción de fisión nuclear.

Un submarino es una embarcación capaz de navegar en la superficie o debajo del agua. Logran ascender y descender gracias a los lastres, los cuales son un sistema de tanques que se llenan de agua para poder hundirse, o, por el contrario, para poder salir a la superficie, expulsan el agua y se le inyecta aire a presión. Para poder llevar a cabo estos procesos, los submarinos requieren de una fuente de energía eléctrica. Los diseños convencionales cuentan con baterías que les suministran la electricidad cuando se encuentran sumergidos y motores diésel cuando la embarcación está en la superficie del agua, así mismo, estos motores se utilizan para recargar las baterías. Esto limita el tiempo que la embarcación puede estar sumer-

gida, así como la velocidad que pueden alcanzar bajo el agua.

Con el objetivo de tener submarinos que pudieran pasar más tiempo sumergidos, se buscaron fuentes de energía que fueran capaces de suministrar energía de manera constante y segura por largos periodos de tiempo. Es así como nació la idea de utilizar reactores nucleares en los submarinos, surgiendo así el término “submarino nuclear”, lo cual hace referencia a la procedencia de la energía utilizada, la cual es de origen nuclear, y no a que los submarinos tengan o no armamento nuclear.

Los trabajos sobre propulsión marina nuclear comenzaron en la década de 1940, y el primer reactor de prueba se puso en marcha en Estados Unidos de América (EUA) en 1953. El primer submarino de propulsión nuclear, el USS Nautilus, se hizo a la mar en 1955 (Friedman, 2023). Esto marcó la transición de los submarinos de lentos buques submarinos a buques de velozes, los submarinos convencionales pueden mantener una velocidad bajo el agua de 13 nudos (24 km/h), mientras que los de propulsión nuclear pueden hacerlo arriba de 20 nudos (37 km/h). Los nuevos diseños alcanzan una velocidad de 29 nudos (53 km/h), con una potencia de 36.7 MW. A demás, al utilizar combustible nuclear, pueden permanecer sumergidos por



Figura 2. Primer submarino nuclear.



más tiempo, ya que no hay necesidad de subir a la superficie a recargar las baterías o combustible diesel con frecuencia.

Actualmente, EUA, Rusia, Reino Unido, Francia, China e India son los países que cuentan con submarinos nucleares. En recientes meses, Australia y Brasil anunciaron su interés por adquirir esta tecnología nuclear.

Los reactores nucleares utilizados en submarinos son generalmente reactores de agua a presión (PWR, por sus siglas en inglés) y reactores rápidos enfriados con plomo (LFR, por sus siglas en inglés). Dentro del submarino, el reactor nuclear proporciona el calor que impulsa una turbina de vapor, la cual, a su vez, impulsa una hélice (WNA, 2023).

El proceso inicia en el núcleo del reactor, en donde se llevan a cabo los procesos de fisión nuclear, este fenómeno libera grandes cantidades de energía en forma de calor, el cual es removido por el fluido refrigerante, el cual, en algunos diseños, también actúa como moderador de los neutrones. En los reactores PWR el refrigerante/moderador es el agua, en el caso de los reactores LFR, no se requiere un moderador, por lo que se utiliza plomo o una mezcla de plomo-bismuto como refrigerante (Morison et al., 1998).

El refrigerante se envía al generador de vapor, el cual es un intercambiador de calor en donde se transfiere el calor del refrigerante al agua, generando vapor, el cual es enviado a un sistema de turbinas; en algunos diseños, el reactor cuenta con una turbina de alta potencia, en otros, con dos turbinas, una de alta y otra de baja potencia. Una vez que el vapor sale de la turbina, pasa por un condensador, con el fin de tener nuevamente agua y repetir el proceso en el generador de vapor. El refrigerante, después de pasar por el generador de vapor, regresa al núcleo del reactor nuclear para repetir el proceso de refrigeración.

La turbina genera electricidad, la cual es enviada a un motor eléctrico, el cual mueve la hélice que impulsa el submarino. Además de alimentar el motor, la electricidad es utilizada para otras operaciones y servicios dentro del submarino.

En la mayoría de los casos, el refrigerante en el reactor circula mediante una bomba. Los reactores también pueden disponerse de manera que las diferencias de temperatura (por ejemplo, entre la parte del reactor que contiene el combustible y el resto del reactor) obliguen al refrigerante a circular de forma natural.

El metal líquido que se ha utilizado en los reactores LFR para submarinos es una

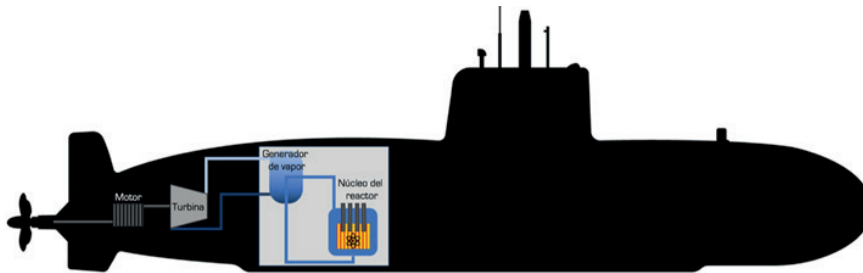


Figura 3. Reactor nuclear en un submarino.

mezcla eutéctica de plomo-bismuto, en este campo, Rusia tiene mucha experiencia, la cual inició en la década de los años 80. El reactor refrigerado por metal líquido funciona según el principio de que el metal fundido puede transportar mucho más calor que el agua, por lo que se puede utilizar una turbina más compacta (Hans et al., 2002).

En contra de esa ventaja, el metal fundido puede volverse altamente radiactivo, de modo que las fugas, que ya son bastante peligrosas en reactores PWR, lo son mucho más en estos reactores LFR. En segundo lugar, las bombas de estos reactores deben ser mucho más potentes. Por último, siempre existe la posibilidad de que se pierda suficiente calor como para que la planta se bloquee y el metal se solidifique en las tuberías, con resultados catastróficos.

La Marina de los EUA desarrolló prototipos de agua a presión y de metal líquido. Completó sus dos primeros submarinos nucleares, el Nautilus y el Seawolf, para probar los dos tipos, pero problemas (incluidas fugas) en el reactor Seawolf llevaron al abandono del plan de metal líquido. Posteriormente, la marina también desarrolló reactores de circulación natural (EPA, 2023).

Las armadas nucleares de los diversos países han empleado reactores de agua a presión o de circulación natural, con excepción de Rusia, ya que cuenta con velozes submarinos que operan con reactores de metal líquido, los cuales iniciaron su construcción en la década de 1970 y su operación en 1980 y algunos de ellos aún siguen operando.

Los submarinos fueron diseñados como embarcaciones para exploración marítima, sin embargo, su uso se ha enfocado

principalmente en la armada. La llegada de los submarinos nucleares tuvo dos grandes consecuencias; uno es el surgimiento de un tipo de submarino completamente nuevo: el submarino estratégico y la otra es una revolución en la guerra antisubmarina, en la que los submarinos de ataque se convertirán en las principales armas ante estas tecnologías.

Los submarinos de ataque están armados con torpedos y, en algunos casos, con misiles antibuque. Los submarinos estratégicos pueden llevar armas similares, pero sus armas principales son misiles balísticos. Además de utilizarse en submarinos, los reactores nucleares también han sido utilizados en los buques rompehielos, principalmente en Rusia, permitiendo que los buques operen por largos periodos de tiempo y tengan la potencia necesaria para romper las capas de hielo, pasando meses y hasta años sin necesidad de regresar a puertos por combustible.

#### Referencias:

EPA. *Nuclear Submarines and Aircraft Carriers*. United States Environmental Protection Agency. Mayo 2023. Recuperado de: <https://www.epa.gov/radtown/nuclear-submarines-and-aircraft-carriers>

Hans B. Honerlah, Brian P. Hearty. *Characterization of the nuclear barge Sturgis*. WM'02 Conference, February 24-28, 2002, Tucson, Arizona. (2002) Recuperado de: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/2002/Proceedings/44/168.pdf>

Morison, J., Steele, M., & Andersen, R. Hydrography of the upper Arctic Ocean measured from the nuclear submarine USS Pargo. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 45(1), 15-38. (1998)

Norman Friedman. Nuclear submarine. Encyclopaedia Britannica. Diciembre 2023. <https://www.britannica.com/technology/nuclear-submarine>

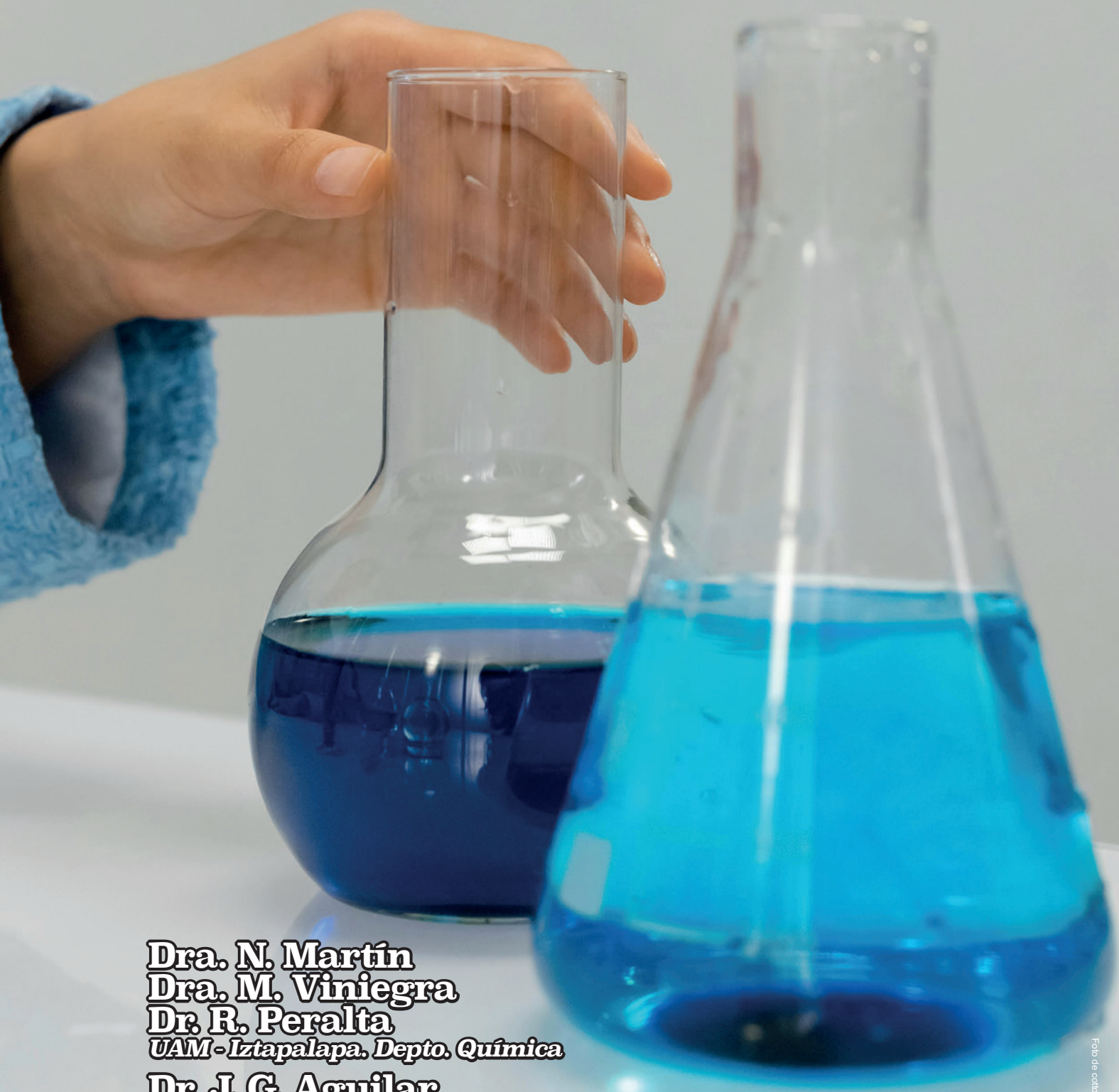
Smith, Craig (2010). Lead-Cooled Fast Reactor (LFR) Design: Safety, Neutronics, Thermal Hydraulics, Structural Mechanics, Fuel, Core, and Plant Design. A compendium of Reactor Technology. Lawrence

Livermore National Laboratory. Estados Unidos de América.

WNA. *Nuclear-Powered Ships*. World Nuclear Association. Octubre 2023. Recuperado de: <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx>



# Nanopartículas metálicas soportadas como catalizadores



**Dra. N. Martín**  
**Dra. M. Viniegra**  
**Dr. R. Peralta**  
*UAM - Iztapalapa, Depto. Química*

**Dr. J. G. Aguilar**  
**Dra. J. Aguilar**  
*UAM - Azcapotzalco, Área de Química Aplicada*

## Resumen

Desde su creación en 1987, el grupo “*catálisis heterogénea*”, de la UAM-Iztapalapa, ha desarrollado investigación centrada en la síntesis, desarrollo y evaluación de catalizadores sólidos a base de metales y óxidos de metales en reacciones diversas como son, la reformación de naftas, oxidación de alcoholes, transformación de glicerol, hidrodechloración de dicloroetileno, entre otras. Se presenta una cronología histórica de las líneas de investigación realizadas.

**Palabras Clave:** Catálisis heterogénea, Nanopartículas metálicas; MOFs; Catalizadores metálicos; Metales soportados.

## Abstract

Since its creation in 1987, the “heterogeneous catalysis” group, at the UAM-Iztapalapa, has developed research focused on the synthesis, development and evaluation of solid catalysts based on metals and metal oxides in diverse reactions such as the reforming of naphtha, oxidation of alcohols, transformation of glycerol, hydrodechlorination of dichloroethylene, among others. A historical chronology of the lines of research carried out is presented.

**Keywords:** Heterogeneous catalysis; Metallic nanoparticles; MOFs; Metallic catalysts; supported metals.

## Introducción

Presentamos una revisión de las líneas de investigación que el grupo *catálisis heterogénea* de la UAM-Iztapalapa ha trabajado durante 4 décadas. Entre ellas, se incluye el trabajo con colaboraciones realizadas con el Depto. de Ingeniería Química y de Procesos e Hidráulica de la misma UAM-I y con el área de Química Aplicada de la UAM-Azcapotzalco.

La UAM se crea en el año 1974 y es en 1978 que se crea el área de catálisis dentro del departamento de química de la UAM-Iztapalapa, con el tema, principalmente, de catálisis heterogénea. En 1984 se inició el posgrado en ciencias (química) en la institución. Posteriormente, en 1987 el área se dividió y se tuvo la formación de nuestro grupo de investigación con el nombre temporal de “*La Perestroika*”, llamado así por los acontecimientos históricos de la época (década de los 80), integrado por profesoras y profesores que en aquel momento estaban como candidatos a doctor (de la UAM-I): el Dr. Gilberto Córdoba, el Maestro Alejandro López-Gaona, la Dra. Nancy C. Martín, la Dra. Patricia Villamil y la Dra. Margarita Viniegra.

El grupo que luego se llamó *catálisis heterogénea*, inició con investigación propia en 1990 y, en forma general, se enfocó en las dos líneas de investigación siguientes: el uso de nanopartículas de metales u óxidos metálicos soportados como catalizadores en reacciones de oxidación e hidrogenación de hidrocarburos y posteriormente, se incorporó la del desarrollo y estudio teórico de materiales con aplicaciones tecnológicas.

Antes de presentar la primera línea de investigación, se hará una breve introducción sobre qué son las nanopartículas metálicas soportadas y luego, se abordarán los trabajos realizados por el grupo en cada período desde 1990.

## Nanopartículas metálicas soportadas

La catálisis heterogénea, llamada también catálisis en la interfase, se caracteriza por tener a los reactivos y los catalizadores en diferentes fases. En la mayoría de los procesos el catalizador es un sólido y los reactivos son gases o líquidos. Para un

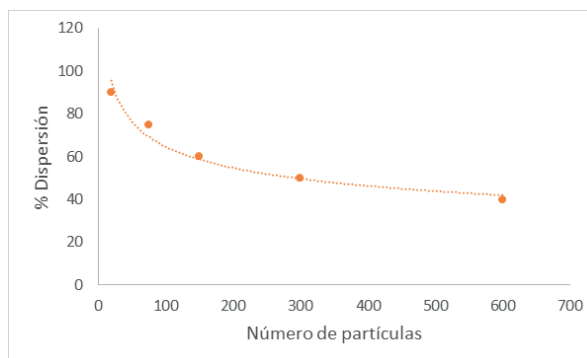
catalizador sólido los componentes activos como los metales u óxidos de metales, usualmente en baja concentración, se fijan en un estado disperso sobre un soporte.

Desde hace muchas décadas las nanopartículas (NPs) metálicas, llamadas así por su tamaño, el cual se encuentra entre 1 y 100 nm, son la base de diversos procesos químicos catalíticos. La catálisis por metales de transición es una rama muy atractiva y con aplicaciones varias en procesos de reacciones de oxidación y de hidrogenación bajo condiciones moderadas de presión y de temperatura (Thomas y Thomas, 1997).

El fenómeno de la catálisis es parte de nuestra vida cotidiana y también de los seres vivos, puesto que todos los procesos del cuerpo dependen de catalizadores biológicos, llamados enzimas, que generalmente son proteínas. Por su parte, los catalizadores que se utilizan en los procesos químicos y en el control ambiental son primordialmente compuestos de naturaleza inorgánica que pueden clasificarse en metales, óxidos, sulfuros y ácidos sólidos, aunque en la práctica los catalizadores casi siempre contienen compuestos de al menos dos de estas categorías. En particular los metales deben utilizarse en forma de nanopartículas para maximizar el área accesible a los reactivos, pero dado que son inestables en ese estado, es necesario unirlos a la superficie de un soporte, de tal manera que las NPs no puedan estar en contacto unas con otras; este tipo de catalizadores son llamados catalizadores metálicos soportados (Zanella y col. 2014). Las NPs inorgánicas resultan interesante debido a sus propiedades ópticas, electrónicas, magnéticas y catalíticas, únicas (Grieve *et al.*, 2000; Lu y col., 2007; Medintz y col., 2005; Shipway y col.,

2000), muchas de las cuales pueden ser diseñadas con sólo cambiar su tamaño, forma, o la funcionalización de la superficie de la nanopartícula, sin cambiar la composición del material.

Cuando los átomos se aglomeran en grupos de tres o cuatro átomos sobre un soporte se dice que tenemos átomos superficiales en forma aglomerada (*clusters*). Pueden rodearse de vecinos y crecer a lo largo de una superficie. Con frecuencia se describe a la partícula metálica de un tamaño finito por su dispersión metálica, que se define como la relación de los átomos que están en la superficie y el número total de átomos. (Figura 1) y se correlaciona con el número de partículas.



**Figura 1.** Porcentaje de dispersión metálica en función del número de partículas

La disminución del tamaño de partícula conduce a que una gran cantidad de átomos estén disponibles como sitios activos en la superficie de las partículas, lo que generará catalizadores altamente reactivos, pues la actividad química en muchas reacciones es proporcional al número de especies activas accesibles a los reactivos (Thomas y Thomas, 1997). Así, la llamada nanocatálisis tiene como fin controlar las reacciones catalíticas por medio de la optimización del tamaño, dimensionalidad,



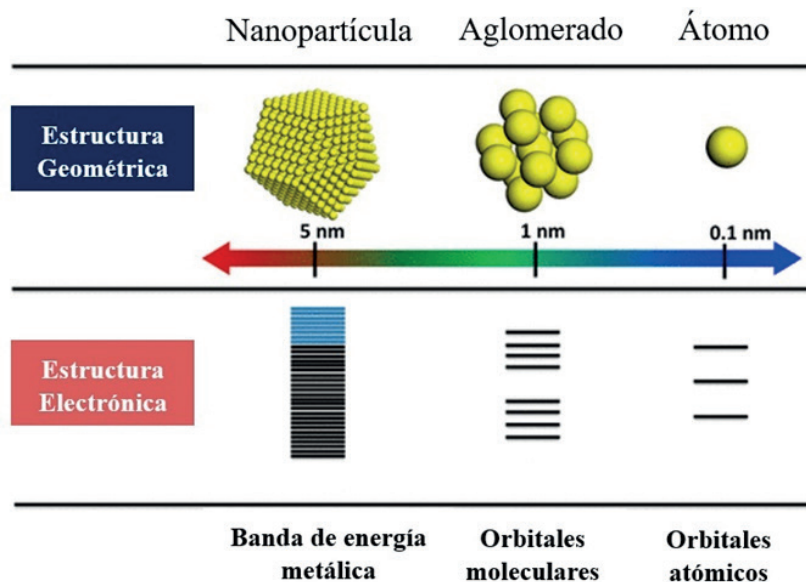
composición química y morfología de las nanopartículas que constituyen la fase activa del catalizador (Wachs, 2001).

El efecto de las NPs metálicas sobre diversos soportes tienen muchas ventajas. El soporte de un catalizador puede ser inerte o activo en las reacciones y puede actuar como estabilizador para evitar la aglomeración de NPs metálicas. Los soportes pueden cooperar con éstas para promover reacciones simultáneas. Por tanto, la elección del soporte adecuado es un tema relevante.

La importancia del tamaño y forma de las nanopartículas de metal u óxido soportados correlacionadas con su estructura electrónica se estudia mediante técnicas térmicas y fotoinducidas. Se ha reportado, en catalizadores metálicos soportados, que las propiedades fisicoquímicas difieren al comparar partículas del orden de 0.1 nm (un solo átomo, *single atom*), con partículas de 1 nm (aglomerados, *clusters*), o de 5 nm (nanopartículas) y debido a estas diferencias en tamaño se observan cambios en las interacciones con el soporte y su evolución durante

la reacción, lo cual afecta la actividad y la selectividad catalítica. Por tanto, es importante analizar los efectos geométrico y electrónico del catalizador según cada una de estas especies: un solo átomo, aglomerados o nanopartículas (Liu y Corma, 2018).

Se considera que los grupos pequeños (<1–2 nm) pierden sus propiedades electrónicas, esto es, cuando desaparecen las características asociadas al enlace metálico (3–50 nm) y las partículas se describen mejor con la teoría de orbitales moleculares o atómicos; se puede inferir que las partículas metálicas cambian sus propiedades electrónicas fuertemente cuando están por debajo de tamaños subnanométricos (~ 1 nm) (Figura 2). Se podría esperar que los metales cuando se agrupan en tamaños subnano interactuarán de manera diferente con los reactivos, mostrando reactividad distinta en comparación con las nanopartículas grandes. La estructura electrónica dependiente del tamaño es más significativa cuando las nanopartículas metálicas constan de menos de 40 átomos (Liu y Corma, 2018).



**Figura 2.** Diferencias entre nanopartículas, aglomerados y un átomo. (Editado de Liu y Corma 2018)

### Período 1990-1999 (Hidrogenación y metales)

Después de la segunda guerra mundial, las arcillas tratadas con ácidos fueron muy usadas para el craqueo catalítico por su estabilidad en un largo tiempo de reacción. Posteriormente, fueron sustituidas por catalizadores sintéticos de sílica-alúmina que resultaron más estables y con una mejor selectividad a una gran distribución de productos. Para 1960, se reportan a las zeolitas sintéticas como catalizadores activos y selectivos para reacciones de isomerización de hidrocarburos. En 1974, se introduce a la zeolita sintética ZSM-5 para nuevos procesos industriales, en particular para el proceso MTG para convertir metanol a gasolinas, en el cual resultó tener propiedades excelentes como la selectividad de forma, el carácter ácido, la resistencia a la desactivación por coque, entre otras. En la década de los 70, para el reformado catalítico, como el reformado de naftas, se reporta como catalizador el de platino finamente disperso en una  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , el cual, por su carácter dual, de la fase metálica y el carácter ácido del soporte, le confieren propiedades hidrogenantes y deshidrogenantes necesarias en el proceso. Para hacer más eficiente la hidrogenólisis (ruptura de los enlaces C-C) y disminuir el envenenamiento por coque de los catalizadores de Pt se introduce el uso de catalizadores bimetálicos (Pt-Ir) (Thomas y Thomas, 1997).

En la década de los 90, sigue en auge la investigación de catalizadores para los diversos procesos de la industria petrolera, en particular, para los procesos de reformación de naftas e hidrocraqueo de hidrocarburos. El soporte estrella de la época, y lo sigue siendo actualmente, por sus múltiples propiedades y muy usado en catáli-

sis, es la gamma alúmina ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ). NPs de Pt soportadas en alúmina han mostrado ser muy activas en muchas reacciones (Thomas y Thomas, 1997).

Uno de los estudios realizados en este período de los 90 fue el de la hidrogenación de o-xileno sobre catalizadores de paladio soportados sobre sílice, alúmina y sílice-alúmina (M. Viniegra y col. 1990)]. El objetivo de este trabajo fue establecer como la dispersión del metal o el soporte jugaban un papel importante en la determinación de la estereoselectividad del paladio. Se observó que la producción del producto trans-hidrogenado, aumentaba con la acidez del soporte ( $\text{SiO}_2 < \text{Al}_2\text{O}_3 < \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ ) y disminuía en presencia de moléculas donadoras de electrones como la piridina. Estos resultados se explicaron en términos del carácter electrofílico del paladio cuando está soportado sobre soportes ácidos, como la  $\gamma$ -alúmina y la sílice-alúmina (Figueras F. y col., 1973), y considerando que el o-xileno actúa como una base de Lewis hacia la superficie del metal (Stairs P., 1982). Esto es, que la fuerza del enlace entre los reactivos y la superficie determinan la estereoselectividad del paladio e influye en la composición de los productos termodinámicamente favorecidos (Viniegra M. y col., 1991).

Para continuar con estos estudios y ver si este modelo era aplicable a otros metales, se realizó la hidrogenación de o-xileno sobre catalizadores de Ru con diferente dispersión soportados sobre sílice y sílice-alúmina. Los resultados aquí reportados llevaron a las siguientes conclusiones: i) La selectividad del Ru se ve alterada por la dispersión del metal, la acidez del soporte y la presencia de residuos carbonosos. 2) El modelo de reacción de “reversión”

se puede aplicar a la hidrogenación de o-xileno sobre Ru para explicar la formación del producto trans-hidrogenado. 3) El Ru debería adsorber o-xileno y especies intermedias más débilmente que el Pd para producir más producto cinéticamente preferido (cis-DMCH). 4) La diferencia entre Ru y Pd, en cuanto al efecto de la dispersión sobre la actividad catalítica y el proceso de desactivación, puede deberse a una falta de hidrógeno activado en la superficie del Ru (Viniestra M. y col., 1992). En catalizadores bimetálicos Ru-Pd/SiO<sub>2</sub> se observó un pequeño máximo de actividad a temperaturas en las que el paladio está inactivo. La estereoselectividad de los catalizadores bimetálicos difería notablemente de la del rutenio monometálico. Se sugiere que un efecto ligando entre los átomos de Ru y Pd de la superficie es el responsable del comportamiento catalítico de los catalizadores bimetálicos (Viniestra M. y col., 1995).

### **Periodo 2000-2010 (Desactivación por coque e hidrodechlorinación)**

En un proyecto de colaboración con el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), se realizaron estudios de desactivación por coque de catalizadores de reformación. Se investigaron la cantidad y naturaleza de los depósitos de carbono en catalizadores de platino soportados sobre una mezcla de alúmina- $\beta$ -zeolita, no neutralizada y neutralizada con cesio, y se compararon con los de un catalizador comercial (Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Los catalizadores se desactivaron en la reacción modelo de metilciclopentano. La caracterización del coque se realizó mediante análisis elemental, oxidación a temperatura programada (TPO), transformada de Fourier infrarroja (FTIR) y RMN de <sup>13</sup>C (CP/MAS). La diferencia significa-

tiva entre Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Pt soportado sobre una mezcla de  $\gamma$ -alúmina y  $\beta$ -zeolita es la naturaleza de los depósitos de carbón. El análisis elemental, TPO, FTIR y RMN de <sup>13</sup>C (CP/MAS) señalaron diferentes características de los depósitos. El catalizador zeolítico neutralizado por Cs presentó cantidades similares de residuos de carbono, pero fue el más desactivado. Los resultados señalan sitios ácidos con diferentes respuestas a los residuos carbonosos (Martin N. y col, 2004).

En otro estudio, se analizaron los depósitos de carbono en catalizadores industriales de Pt-Sn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se caracterizaron mediante una combinación de diferentes técnicas, incluido el análisis elemental, AFM, TPO y espectroscopía de RMN <sup>13</sup>C-CP/MAS. Además de la evaluación cualitativa y cuantitativa detallada, que mostró la misma cantidad de carbono en todas las muestras, se encontró que el coque en los catalizadores industriales era de tipo aromático, independiente del número de ciclos de uso. El análisis de TPO señaló una diferencia entre los catalizadores industriales y el catalizador tratado en el laboratorio como un sistema modelo, mostrando claramente que existen dos tipos de coque o dos tipos de sitios (interfase sustrato versus metal-sustrato) en la formación de coque. El análisis AFM reveló características de dos tipos de morfología del coque, descritas como fases de coque laminada (estructura en forma de disco elíptico) y granular (esférica). Se observaron grandes agregados de coque en defectos superficiales, como bordes de grano. En general, nuestros resultados mostraron que la naturaleza del coque depende del proceso de desactivación, y que el coque en el catalizador industrial podría describirse y definirse con éxito (Martin N. y col., 2005).



También se estudió el efecto del óxido de lantano sobre la resistencia al coque de un catalizador Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Se evaluó la actividad y selectividad en la reacción modelo de hidrogenólisis de metil-ciclopentano, obteniendo el siguiente orden de actividad: Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> >> Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > Pt/La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. En cuanto a selectividad, fueron similares en todas las muestras, característica de los catalizadores bifuncionales, esto es, productos de apertura de anillo (2-metilpentano, 3-metilpentano, n-hexano) y productos ligeros, así como también de alargamiento de cadena (c-hexano y benceno) y formación de alquenos (metil-penteno y hexeno). El benceno fue el producto mayoritario, el cual se produce por la combinación de la función metálica y la función ácida del soporte. En relación con la formación de coque, fue similar en los soportados en alúmina y alúmina-lantano y mayor que en el soportado en lantano (Martin N y col., 2007).

En un giro de la investigación y en colaboración con un proyecto del área de ingeniería química, se estudió a la reacción de hidrodechloración (HDCl) en fase líquida, la cual es una vía efectiva para el tratamiento de compuestos orgánicos clorados, que son contaminantes del suelo y agua. Se estudiaron catalizadores de Pt y Pd soportados en MCM-41 y SiO<sub>2</sub> en la hidrodechloración de 1,2-dicloroetano, donde fueron activos en el siguiente orden: Pd/MCM > Pd/SiO<sub>2</sub> > Pt/MCM > Pt/SiO<sub>2</sub>. Además, se encontró una alta selectividad hacia el etileno en todos los ca-

talizadores. Las diferencias en actividad estuvieron relacionadas con las estructuras entre ambos soportes obteniendo una mayor dispersión metálica en los soportes mesoporosos (Martin N. *et al.* 2008). De igual forma se evaluó la actividad en la HDCl de 1,2-dicloroetano (DCE) de catalizadores de Pt soportados en una sílice mesoporosa (HMS) sintetizada en el laboratorio. Se obtuvo una mayor actividad en el catalizador mesoporoso en relación con el soportado en sílice, lo cual estuvo relacionado con el tamaño más pequeño de las partículas de platino en el primero (Martin N. y col., 2011). También se evaluó la actividad en la reacción de hidrogenación de benceno e hidrogenólisis de metil-ciclopentano obteniendo una mayor actividad en los soportados en el HMS (Martin N. y col., 2010). El efecto de TiO<sub>2</sub> en catalizadores de Pt, Pd y Rh soportados en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Pt/AT; Pd/AT; Rh/AT) fue estudiado en la HDCl de 1,2-dicloroetano obteniendo mayor actividad y mejor selectividad a los compuestos no clorados en los catalizadores con mayor proporción de titanía y en el bimetálico PtPd (Tabla 1) (Martín N. y col. 2012).

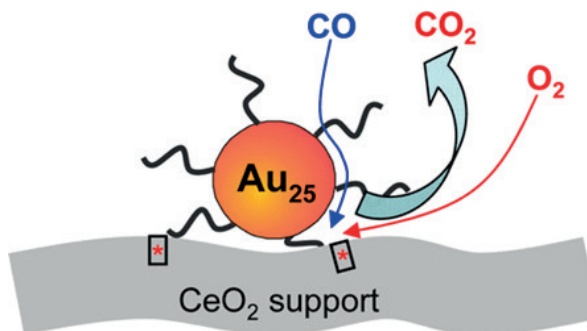
Por otro lado, es sabido que los metales IB muestran distintas propiedades en catálisis heterogénea. Los catalizadores de Cu se utilizan industrialmente a baja temperatura en la reacción de desplazamiento de gas-agua (WGS) y la síntesis de metanol a partir de gas de síntesis. Los catalizadores de Ag son aptos exclusivamente para la epoxidación de eteno.

Catalizador	Pt/HMS	Pt/AT	Rh/AT	Pd/AT	PtPd/AT
$v \times 10^{-3}$ (mol.g <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> )	3.36	0.20	0.80	2.40	3.10
% S (No clorados)	82	80	95	72	85

**Tabla 1.** Velocidad (*v*) de HDCl de DCE a 523 K, presión atmosférica y 60 min de reacción.

Los catalizadores de Au con partículas metálicas de menos de 5 nm son altamente activos para la oxidación de CO y la reacción de WGS a baja temperatura en estudios de laboratorio (Tsubota *y col.*, 1998, Zhu Y. *y col.*, 2018).

Algunos estudios han relacionado no sólo el tamaño de las NPs, sino también su forma con la actividad catalítica, así, por ejemplo, se sabe que las nanopartículas de Au soportadas en óxidos son muy activas en la reacción de oxidación de monóxido de carbono con oxígeno molecular, ( $\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ ). A pesar de que el oro es el más noble de todos los metales de transición, cuando se logra obtener en forma de nanopartículas de menos de 5 nm, soportado en la superficie de varios óxidos, por ejemplo,  $\text{TiO}_2$ , muestra actividades excepcionalmente altas hacia la reacción de oxidación de CO a temperaturas por debajo de la temperatura ambiente (Zanella R., 2014). Estos estudios demostraron el denominado efecto carga entre las nanopartículas metálicas y el soporte, el cual consiste en la transferencia de carga del soporte a las nanoestructuras, si éstas se localizan en sitios con vacancias de oxígeno, entonces el soporte podría donar carga a las nanopartículas y hacerlas altamente activas en la reacción de oxidación de monóxido de carbono (Figura 5), ya que la reacción transcurre, según la teoría de orbitales moleculares, mediante una transferencia de electrones de los orbitales de más alta energía de las nanopartículas al orbital de más baja energía del CO, esto ocasiona la disociación del sustrato y la subsecuente reacción. Por el contrario, si las partículas están soportadas en sitios donde el óxido no presenta defectos estructurales la reacción no ocurre.



**Figura 3.** Nanopartículas de oro soportadas en  $\text{CeO}_2$  en la reacción de oxidación de CO. ACS Nano 2012, 6, 7, 6014–6022, <https://doi.org/10.1021/nn301019f>

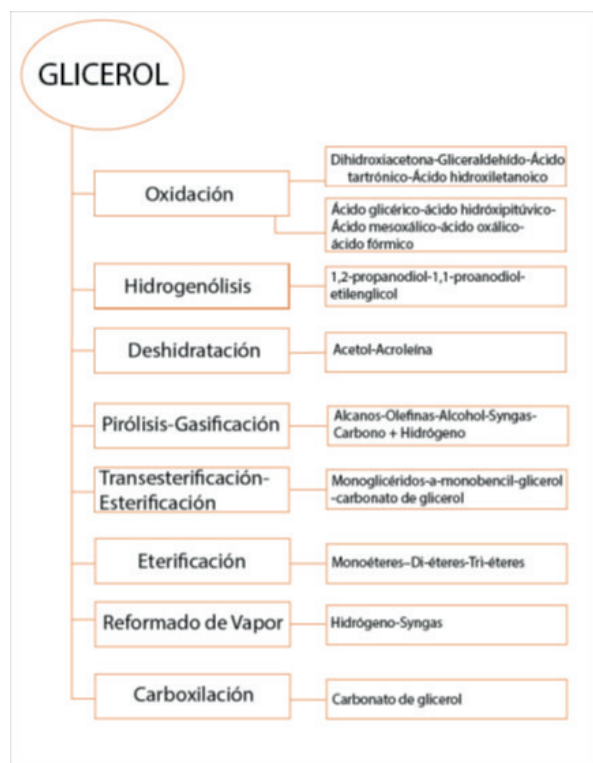
Por tanto, para lograr un catalizador eficiente para la oxidación catalítica se requiere alta movilidad del oxígeno en la red y buena conductividad electrónica. En general, para una reacción selectiva el requerimiento de oxígeno es menos demandante que para las reacciones no selectivas.

En el grupo se evaluó la actividad catalítica de catalizadores de  $\text{CuO}/\text{ZrO}_2$  preparados por impregnación y por el método sol-gel in situ, en la oxidación de CO; los primeros mostraron una mayor actividad catalítica. Esta observación se explicó por la presencia de pequeñas partículas de  $\text{CuO}$  sobre el catalizador preparado por impregnación (mayor dispersión), lo cual no ocurre en los catalizadores obtenidos por el método sol-gel in situ donde una cantidad importante de iones  $\text{Cu}^{2+}$  fueron incorporados a la red del sólido, que se consideran catalíticamente inactivos (Viniegra M. *y col.*, 2010).

### Período 2011-2020 (Transformación de glicerol)

Para 2014, se tuvo un proyecto con la UAM-A sobre la transformación catalítica de glicerol en fase gas, el cual resulta ser un producto secundario en la producción de biodiesel. La reacción de transformación

de glicerol tiene un esquema bastante amplio, con la obtención de productos de alto valor agregado según la ruta que se pueda seguir (Figura 4).



**Figura 4.** Posibles rutas de transformación del glicerol (BSQM, 26, 2018).

En un estudio con catalizadores a base de Pt soportados en ceria y alúmina en la deshidratación de glicerol, ambos catalizadores resultaron activos; bajo nuestras condiciones de reacción los productos principales identificados fueron la acroleína (AC), el alcohol alílico (AA), la hidroxiaetona o acetol (HA) y otros compuestos líquidos y gaseosos no identificados, siendo la selectividad hacia acroleína, la mayor en el Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en tanto que el Pt/CeO<sub>2</sub> presentó mayor selectividad hacia el acetol. Esto fue explicado por las propiedades óxido reductoras del segundo soporte (Martin N. y col., 2018). De igual forma, para esta reacción se estudiaron catalizadores mási-

cos de hierro sintetizados por el método de micelas invertidas, los cuales mostraron alta actividad, estabilidad y una alta selectividad hacia la acroleína, indicativo de que la estructura afecta el mecanismo de la reacción. Posteriormente, se evaluaron catalizadores mono- y bi-metálicos a base de óxidos de hierro y níquel soportados en una alúmina comercial. El orden de actividad fue el siguiente: Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\approx$  Fe-Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Se encontró que todos los catalizadores tenían actividades similares con diferencias notables en su selectividad. Estas diferencias se explican por la interacción entre los óxidos metálicos de los catalizadores bimetálicos, lo que produce cambios en la relación Fe<sup>+3</sup>/Fe<sup>+2</sup>. La producción de alcohol alílico a partir de óxidos bimetálicos puede explicarse por las propiedades redox de estos catalizadores. Una disminución de la relación Fe<sup>+3</sup>/Fe<sup>+2</sup> favorece la formación de alcohol alílico (Martin N. y col., 2020).

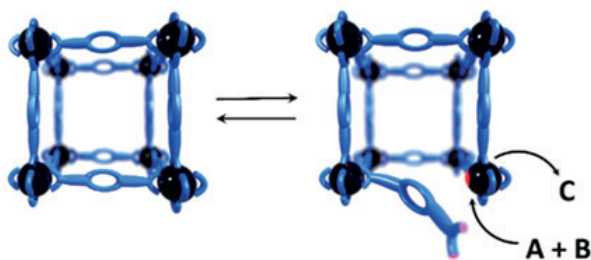
### Período 2020-2023 (Materiales a base de redes metal-orgánicas)

Con el fin de probar nuevos materiales como catalizadores se inició un proyecto con la UAM-A con el uso de las estructuras metal-orgánicas (MOF), donde no se tienen nanopartículas, pero sí metales; estos materiales son relativamente nuevos con creciente relevancia en procesos de adsorción de contaminantes y catálisis heterogénea (Aguilar J. y col., 2022). Estas aplicaciones son posibles debido a propiedades como alta porosidad, fácil síntesis y versatilidad de estructuras, permitiendo el diseño personalizado, según la aplicación de interés. En catálisis los MOF se usan comúnmente como sitios ácidos de Lewis debido a que algunos de estos materiales poseen moléculas de solvente lábiles que pueden ser



eliminadas mediante activación térmica o química para formar sitios abiertos de metal (OMS) (Zhou Y. y col, 2018).

En el grupo se reportó (Aguilar J. y col., 2022) sobre las propiedades inherentes de los MOF que pueden permitir ser excelentes catalizadores. La buena dispersión de los sitios activos y las diversas morfologías de MOF son deseables para una interacción mejorada de los reactivos con el material (Figura 5). Una adecuada disposición de la estructura permite una alta dispersión de los sitios activos, reduciendo así el riesgo de envenenamiento de estos. Además, la fuerza de unión entre el metal y el ligando es suficiente para generar estructuras estables (porosidad y arquitectura), lo cual es ideal para aplicaciones catalíticas (Aguilar J. y col, 2023). Esta extraordinaria diversidad estructural es una característica importante que diferencia los MOFs de otros materiales porosos convencionales como las zeolitas o el carbón activado.



**Figura 5.** Representación de sitios metálicos semiabiertos en los MOFs generados por enlaces metal-ligando móviles que pueden ser empleados en catálisis (Cortesía de Peralta R. y col. 2023).

En un estudio realizado en el grupo, se sintetizó un material de Zn-MOF-74, a temperatura ambiente, que resultó ser un catalizador heterogéneo eficiente para la alcoholisis de apertura de anillo del óxido de ciclohexeno catalizada por

ácido. Esta reacción se rige por la termodinámica, siendo 50 °C la temperatura óptima, donde se obtiene la mayor conversión. Este efecto puede deberse a que el catalizador se regenera más rápido y los reactivos acceden a los sitios insaturados de Zn (II) dentro del material. Bajo las condiciones usadas, se obtuvo una conversión mayor al 73% en las primeras 21 horas y alrededor de 94% en menos de dos días de reacción. De igual forma, el catalizador no mostró degradación, lixiviación, ni disminución de su actividad catalítica en 3 ciclos de reacción (Aguilar J. y col., 2023).

## Conclusiones

Los resultados obtenidos durante cuatro décadas a partir de los proyectos de investigación realizados han contribuido al desarrollo de nuestro grupo de catálisis, con énfasis en la síntesis, caracterización y evaluación de materiales a base de metales y óxidos de metales, en procesos catalíticos. Muchos de los sólidos sintetizados han tenido un excelente desempeño en reacciones tales como reformación de naftas, oxidación de glicerol y de CO, deshidratación de alcoholes, hidrodechloración de 1,2-dicloroetileno, entre otras.

El laboratorio desde su creación ha disminuido su personal, pero están por ingresar tres profesores jóvenes, que podrán seguir trabajando y promoviendo el quehacer científico con el fin de aportar soluciones a muchas de las necesidades actuales. De igual forma, es importante seguir en la búsqueda de financiamiento externo para continuar con los proyectos de investigación en curso.

## Referencias

1. Flores J. G., Aguilar-Pliego, J., Mar-

- tín-Guaregua N., Ibarra I. A. y Sánchez-Sánchez M. *Catal. Today*, 394-396, 295 (2022); *Idem Royal Society Chemistry Adv.*, 13, 27174 (2023); *Idem Coord. Chem. Rev.*, 496, 215403 (2023).
- Figueras R., Gómez R. y Primet M., *Adv. Chem., Ser., I\_22*, 480 (1973).
  - Grieve, K., Mulvaney, P. y Grieser, F. Synthesis and electronic properties of semiconductor nanoparticles/quantum dots. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 5: 168-172 (2000). DOI: 10.1016/S1359-0294(00)00050-9
  - Lu, A. H., Salabas, E. L. y Schuth, F. Magnetic nanoparticles: Synthesis, protection, functionalization, and applications. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 46: 1222-1244 (2007). <https://doi.org/10.1002/anie.200602866>
  - López-Gaona A., De los Reyes José A., Aguilar J. y Martín N. *React. Kinet. Mech. & Catal.*, 99 (1), 177 (2010); *Idem React. Kinet. Mech. & Catal.*, 101, 491 (2010); *Idem, RMIQ*, 11(3), 463 (2012).
  - Liu L. y Corma A. Metal catalysts for heterogeneous catalysis: from single atoms to nanoclusters and nanoparticles. *Chem Rev* 118:4981–5079 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b007>.
  - Martínez-Rico M., Aguilar-Pliego J., Gutiérrez-Arzaluz M., Viniegra-Ramírez M., Martín-Guaregua N. y García-Ruiz M. *RMIQ*, 17 (2), 523 (2018); *Idem JAR&T*, 16, 511 (2018); *Idem JMCS*, 64 (4), 327 (2020).
  - Medintz, I. L., Uyeda, H. T., Goldman, E. R. y Mattoussi, H. Quantum dot bioconjugates for imaging, labelling and sensing. *Nature Mat.*, 4: 435-446 (2005).
  - Martin N., Córdoba G., López-Gaona A. y Viniegra M. *React. Kinet. & Catal. Lett.*, 44 381 (1991); *Idem J. Mol. Catalysis*, 58, 107 (1990); *Idem React. Kinet. & Catal. Lett.*, 49 (2), 353 (1993); *Idem, J. Molec. Catalysis*, 96 (2), 155 (1995). [https://doi.org/10.1016/1381-1169\(94\)00041-7](https://doi.org/10.1016/1381-1169(94)00041-7).
  - Martín N., Viniegra M., Lima E. y Espinosa G. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 1206 (2004); *Idem, Catal Today*, 107-108 (2005), 719-725; *Idem, Ind. Eng. Chem. Res.*, 46, 4335 (2007); *Idem, Materials Research Innovations*, 14(2). 183-188 (2010).
  - Sapi András, Rajkumar T., Kiss Janos, Kukovecz Ákos, Kónya Zoltán y Somorjai Gabor A., *Metallic Nanoparticles in Heterogeneous Catalysis, Catalysis Letters* 151:2153–2175 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10562-020-03477-5>
  - Shipway, A. N., Katz, E. y Willner, I. Nanoparticle arrays on surfaces for electronic, optical, and sensor application. *Chem. Phys. Chem.*, 1: 18-52 (2000). [https://doi.org/10.1002/1439-7641\(20000804\)1:1<18::AID-CPHC18>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/1439-7641(20000804)1:1<18::AID-CPHC18>3.0.CO;2-L)
  - Stair P. C. The concept of Lewis acids and bases applied to surfaces. *J. Am. Chem. Soc.*, 104, 4044 (1982). <https://doi.org/10.1021/ja00379a002>
  - Thomas J. M. y Thomas W. J. *Principles and practice of heterogeneous catalysis*. VCH Alemania (1997).
  - Tsubota, S., Nakamura, T., Tanaka, K. y Haruta, M. (1998) Effect of calcination temperature on the catalytic activity of

Au colloids mechanically mixed with TiO<sub>2</sub> powder for CO oxidation. *Catal. Lett.*, 56: 131-135. Zanella Rodolfo. Aplicación de los nanomateriales a la catálisis. *Mundo Nano*, 7 (12), 66 (2014).

16. Zhou Y., Yin Ch, Li Y. y Shen W. Dynamic behavior of metal nanoparticles for catalysis. *Nanotoday*, 20, 101-120 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2018.04.005>.



# Un nuevo horizonte tecnológico para los dispositivos en el infrarrojo: integración de antimonio, silicio y grafeno



**M.C. Nayeli Colin Becerril**

*Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional*

**Dr. Manolo Ramírez López**

*Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional*

**Dr. Gerardo Villa Martínez**

*Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Unidad Ticomán, Instituto Politécnico Nacional*

**Dra. Patricia Rodríguez Fragoso**

*Departamento de Física, Centro de Investigación  
y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional*

**Dr. José Luis Herrera Pérez**

*Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería  
y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional*

**Dr. Julio Mendoza Álvarez**

*Departamento de Física, Centro de Investigación  
y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional*

**Dra. Yenny Lucero Casallas Moreno**

*Conahcyt- Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería  
y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional*

## Resumen

Los antimonuros, el silicio y el grafeno están en camino de revolucionar el mundo de los dispositivos en el infrarrojo. La magia ocurre cuando estos materiales se combinan en una estructura única, potenciando sus propiedades excepcionales y dando lugar a lo que podría llamarse una “superestructura” con una eficiencia sin precedentes. Este avance abre la posibilidad a una nueva generación de dispositivos flexibles, económicos y de bajo consumo de energía. Estos dispositivos en el infrarrojo desempeñan un papel crucial en áreas estratégicas de nuestra sociedad, como las comunicaciones, la energía, el medio ambiente y la salud. Así que exploremos las ventajas de la integración de estos materiales y de cómo nos sorprenderán en el futuro.

**Palabras clave:** antimoniuro de galio, silicio, grafeno, dispositivos en el infrarrojo.

## Abstract

Antimonides, silicon and graphene are poised to revolutionize the world of infrared devices. The magic unfolds when these materials are combined into a unique structure, enhancing their exceptional properties, and giving rise to what could be called a “superstructure” with unprecedented efficiency. This advance opens the possibility of a new generation of flexible, cost-effective, and energy-efficient devices. These infrared devices play a crucial role in strategic areas of our society, such as communications, energy, environment, and health. Let’s explore the advantages of integrating these materials and how they will surprise us in the future.

**Keywords:** gallium antimonide, silicon, graphene, infrared devices.

## Introducción

Los semiconductores son materiales fundamentales en la fabricación de los dispositivos electrónicos, optoelectrónicos, fotovoltaicos y fotónicos, entre otros. Dispositivos que desempeñan roles cruciales en áreas como la comunicación, la industria, la energía, el medio ambiente y la salud. A pesar de su importancia, desde comienzos del año 2020, el mundo ha experimentado una crisis de semiconductores de gran envergadura, enmarcada por las dificultades de producción del reducido grupo de países asiáticos que son responsables de la fabricación de entre el 65-70% de los semiconductores a nivel mundial, siendo Taiwán el más relevante (Chi-Tai Wang, 2014). Este contexto ha resaltado la necesidad de desarrollar una nueva generación de dispositivos que sean flexibles, económicos, de bajo consumo de energía y que no contaminen.

Durante décadas, el silicio (Si) ha dominado la industria tecnológica de los semiconductores gracias a sus excelentes propiedades eléctricas. También, gracias a que es uno de los elementos más abundantes en la Tierra, por lo que constituye una de las materias primas más accesibles y económicas. Sin embargo, la tecnología de fabricación de dispositivos nanométricos basados en silicio está llegando al límite de los 3 nm, y superarlo representa un desafío tecnológico sin precedentes. Por ejemplo, la empresa neerlandesa ASML, especializada en la fabricación de máquinas para la producción de circuitos integrados, ha logrado desarrollar un sistema conocido como “Extreme Ultraviolet Lithography (UEV)” (Zeng, 2023). Este sistema utiliza una longitud de onda ultracorta proporcionada por un láser de plasma, así como sistemas de enfoque y proyección de alta

precisión que han permitido alcanzar la resolución para superar el límite nanométrico. No obstante, su complejidad y elevado costo han impedido que sea asequible para el sector tecnológico en general.

Estos hechos han fortalecido la concepción tecnológica “More than Moore” que sostiene que el proceso de miniaturización está alcanzando límites físicos y que la investigación en dispositivos debe migrar a mejorar la funcionalidad, el rendimiento y la eficiencia energética de los dispositivos, más allá de reducir su tamaño (Xiaoyue Wang, 2023). Para lograrlo, es crucial la integración de nuevos materiales, tales como los semiconductores III-V y los materiales bidimensionales (2D). Estos materiales están a la vanguardia gracias a sus propiedades únicas y se perfilan como fuertes candidatos para integrarse a la tecnología del silicio. Su integración en la estrategia “More than Moore” amplía significativamente las posibilidades de diseño y fabricación de dispositivos con propiedades avanzadas y con mejores rendimientos, superando a los fabricados únicamente con silicio.

Los semiconductores III-V han facilitado el desarrollo de dispositivos de alta frecuencia, de alta velocidad y de gran resistencia a las temperaturas de operación. Aprovechando estas características se han fabricado transistores, celdas solares, fotodetectores, diodos emisores de luz (LEDs), entre otros. Este grupo de semiconductores y específicamente la familia de antimonio, destaca por su capacidad para manipular el ancho de banda prohibida ( $E_g$ ) en el proceso conocido como ingeniería de banda prohibida. Por su parte, los materiales 2D han ganado un interés creciente tanto en la comunidad científica como en

la industria debido a sus propiedades versátiles. Y es que, a diferencia de los semiconductores tradicionales, los materiales 2D son extremadamente delgados, con tan solo un átomo de espesor. En consecuencia, materiales como el grafeno (G) prometen una revolución sin precedentes en el campo de la nanotecnológica.

A pesar de las notables propiedades y ventajas del silicio, de los antimonio y del grafeno, cada uno presenta desafíos muy difíciles de superar. Por ello, la integración de estos materiales en una estructura, combinando sus mejores propiedades, puede dar lugar a una nueva generación tecnológica en el infrarrojo. De hecho, durante más de 30 años, la integración de los semiconductores III-V y el silicio ha sido un tema de gran interés científico. Sin embargo, esta combinación ha enfrentado grandes dificultades debido a las diferentes propiedades de los materiales, como las constantes de red y los coeficientes de expansión térmica. Así que, la incorporación de la capa de grafeno entre familia de antimonio (en general los semiconductores III-V) y el silicio, permite la liberación de las tensiones entre los materiales para lograr una alta calidad cristalina. Estas novedosas estructuras son de gran relevancia desde el punto de vista de la nanociencia y de la nanotecnología.

### **Semiconductores III-V: familia de antimonio**

Los semiconductores del grupo III-V incluyen familias como los antimonio, los nitruros, los fosfuros y los arseniuros. Estos materiales están constituidos por elementos del grupo IIIA y VA de la tabla periódica. Particularmente, los antimonio se forman mediante la combinación de elementos como el galio (Ga) y el indio (In) jun-



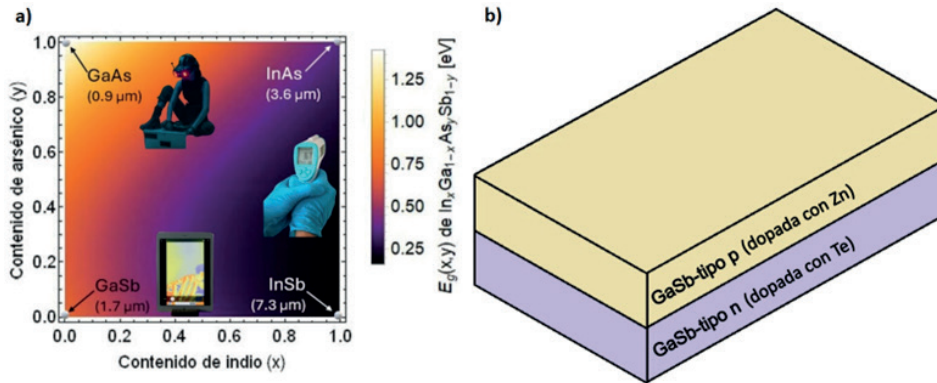


Figura 1. a) Energía de la banda prohibida  $E_g(x,y)$  de la aleación cuaternaria  $In_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$  en función de los contenidos de arsénico ( $x$ ) y de indio ( $y$ ), a temperatura ambiente. b) Estructura formada por una capa de GaSb tipo p (dopada con Zn), y una capa de GaSb tipo n (dopada con Te).

to con elementos como el antimonio (Sb) y el arsénico (As). En esta familia el elemento base es el Sb. De esta manera, los antimonuros están formados por compuestos binarios como el antimoniuro de galio (GaSb), el antimoniuro de indio (InSb), aleaciones ternarias como el  $In_xGa_{1-x}Sb$  y cuaternarias como el  $In_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$  (González-Morales, 2023). Dichas aleaciones presentan propiedades muy interesantes, tal como su energía de banda prohibida  $E_g(x,y)$ , que es la energía mínima necesaria para excitar un electrón desde su estado ligado a un estado libre que le permita participar en la conducción. Además,  $E_g(x,y)$  determina la radiación electromagnética; caracterizada por una longitud de onda y una frecuencia, en la que puede emitir o absorber la aleación. Los antimonuros presentan una energía de banda prohibida directa que abarca desde el infrarrojo cercano (1.7  $\mu\text{m}$  con el GaSb) hasta el infrarrojo medio (3.6  $\mu\text{m}$  con el InAs), a temperatura ambiente (Casallas-Moreno, 2019). Por ejemplo, la Figura 1 (a) muestra con los diferentes colores la energía de la banda prohibida  $E_g(x,y)$  a temperatura ambiente de la aleación cuaternaria  $In_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$  para todas las

combinaciones de contenidos de indio ( $x$ ) y de arsénico ( $y$ ).

El amplio rango de energía de banda prohibida en la que los antimonuros pueden absorber o emitir radiación electromagnética facilita el desarrollo de la ingeniería de banda en el infrarrojo. Esta ingeniería consiste en la manipulación y control de la banda prohibida para una aplicación determinada. Una manera de modificar la energía de la banda prohibida es mediante la incorporación de átomos dopantes en la estructura del compuesto o de la aleación deseada, lo cual es crucial para el desarrollo de dispositivos optoelectrónicos basados en uniones p-n. Un material dopado tipo n o tipo p, es un material que presenta un exceso de electrones o un exceso de huecos (ausencia de electrones), respectivamente. Por ejemplo, los antimonuros se pueden dopar con elementos como el zinc (Zn) para producir un compuesto o aleación tipo p y con el telurio (Te) para generar un compuesto o aleación tipo n. En la Figura 1 (b), se muestra una estructura tipo diodo p-n, en la que sobre un sustrato de GaSb-n se deposita el GaSb-p.

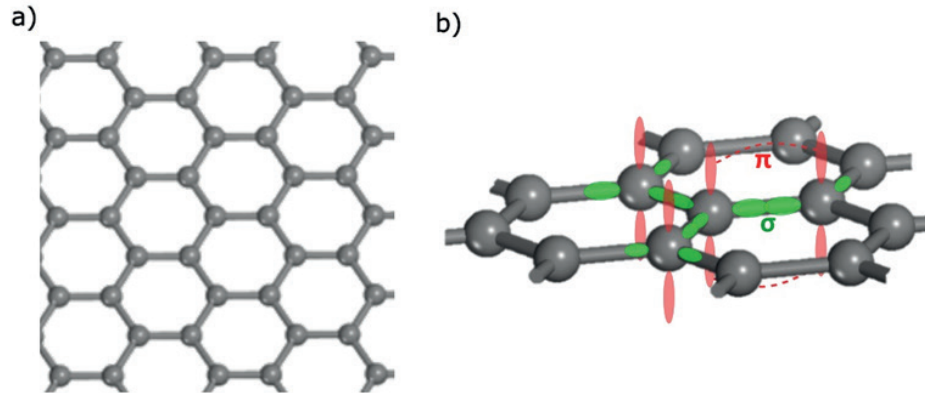


Figura 2. a) Estructura del grafeno tipo panal y b) modelo orbital molecular del grafeno.

La manipulación en la región infrarroja ha permitido el desarrollo de una amplia gama de equipos, desde gafas y cámaras de visión nocturna, termómetros infrarrojos, sensores de movimiento y hasta novedosos equipos médicos como la termografía infrarroja. Estos sistemas en el infrarrojo se pueden emplear en la industria alimentaria y agrícola, para evaluar las etapas de maduración de frutos y la salud de los cultivos. También se pueden utilizar en la medición de gases contaminantes como el monóxido de carbono (CO) y en la generación de electricidad por medio de celdas termofotovoltaicas.

### Material bidimensional: grafeno

El grafeno (G) es un material bidimensional constituido exclusivamente por una única capa (monocapa) de átomos de carbono (C) dispuestos en una estructura cristalina hexagonal, con una apariencia similar a la de un panal de abejas (Figura 2 (a)). La configuración hexagonal de los átomos surge de la interacción entre los electrones en la red cristalina. Cada átomo de C tiene 6 electrones, 4 de los cuales ocupan la capa externa, conocida como capa de valencia. Durante el proceso de formación del grafeno, estos

electrones de valencia experimentan una redistribución. Como resultado, cada átomo comparte 3 de sus 4 electrones de valencia a través de lo que se conoce como enlaces simples de tipo covalente. Estos enlaces reciben el nombre de enlaces sigma ( $\sigma$ ), los cuales se sitúan en un plano formando ángulos de  $120^\circ$  entre sí, como se muestra en el modelo molecular de la Figura 2 (b). Los enlaces  $\sigma$  son responsables de la estructura hexagonal del grafeno y de su excepcional resistencia, aproximadamente 200 veces mayor que la del acero estructural de igual espesor. Además, contribuyen con las propiedades ópticas, dado que el grafeno al estar compuesto por una capa de átomos presenta una alta transmitancia. Solo absorbe el 2,3% de la radiación electromagnética en un amplio rango de longitudes de onda, lo que significa que su transmitancia alcanza el 97,7%.

El electrón de valencia de cada átomo que no participa en la formación de enlaces  $\sigma$ , se sitúa de manera perpendicular a estos enlaces. Esto da lugar a un solapamiento lateral, generando enlaces pi ( $\pi$ ) que se extienden por toda la capa del grafeno, como se observa en la Figura 2 (b). Estos

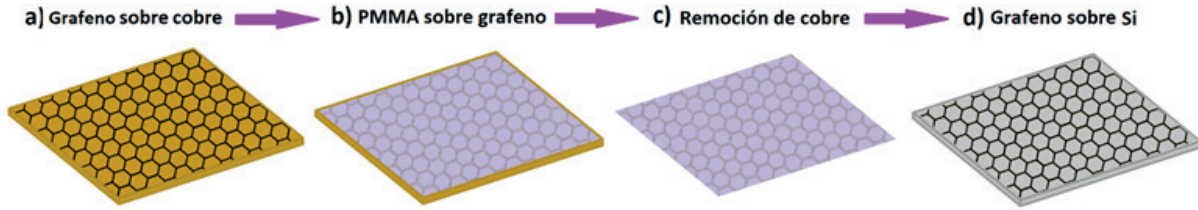


Figura 3. Esquema de la transferencia del grafeno sobre la superficie de silicio.

enlaces  $\pi$  son débiles, por lo que son los responsables de la alta conductividad eléctrica y térmica que exhibe este material. De hecho, la conductividad eléctrica del grafeno supera a la del cobre. Además, las interacciones entre las capas de grafeno, o entre una capa de grafeno y otros materiales, son débiles y se conocen como interacciones de Van der Waals (vdW). Todas estas propiedades han incentivado un gran interés en la aplicación de este material en diversas áreas.

### Proceso de integración: antimoniuros, grafeno y silicio

Uno de los métodos para la integración de la familia de antimonuros, específicamente el GaSb, con el silicio y el grafeno consiste en la formación de una estructura del tipo GaSb/G/Si, donde el Si actúa como la base, ya que es el sustrato o soporte para toda la estructura. La metodología para realizar esta estructura puede ser dividida en las siguientes dos etapas: la transferencia de G sobre la superficie de Si y el depósito de GaSb sobre G/Si. Estas dos etapas se explican a continuación.

#### **Etapa 1: Transferencia de G sobre la superficie de Si**

La Figura 3 representa esquemáticamente los pasos seguidos en la transferencia del G sobre Si. La etapa inicia con el depósito de G sobre cobre (Cu) por medio de la técnica de deposición química de vapor (CVD). Es importante señalar

que la técnica de CVD ha mostrado los resultados más prometedores para la producción de G en grandes áreas. Además, CVD es una técnica relativamente económica que produce G de alta calidad cristalina. Una vez que el G está sobre el Cu (Figura 3 (a)), se cubre la superficie del G con polimetilmetacrilato (PMMA) (Figura 3 (b)). El PMMA es un polímero transparente que actúa como soporte para el G, evitando que se pliegue o fragmente durante el proceso de transferencia. Posteriormente, se remueve la lámina de Cu y se enjuaga el PMMA/G, dejándolo flotar en agua desionizada (Figura 3 (c)). Luego, se coloca el PMMA/G sobre la superficie del sustrato de Si, enseguida se seca el sistema con una pistola de nitrógeno. Finalmente, se elimina el PMMA de la superficie del G con acetona (Figura 3 (d)).

#### **Etapa 2: Depósito de GaSb sobre G/Si**

El depósito de la familia de antimonuros tal como GaSb sobre G/Si se presenta en la Figura 4. El depósito de la estructura se puede llevar a cabo por medio de diferentes técnicas como epitaxia por haces moleculares (MBE, por sus siglas en inglés), depósito químico en fase vapor con compuestos metalorgánicos (MOCVD, por sus siglas en inglés) (Manzo, 2022). Recientemente, nuestro grupo logró este crecimiento mediante la técnica de transporte de vapor en espacio cerrado (CSVTE, por sus siglas en inglés).



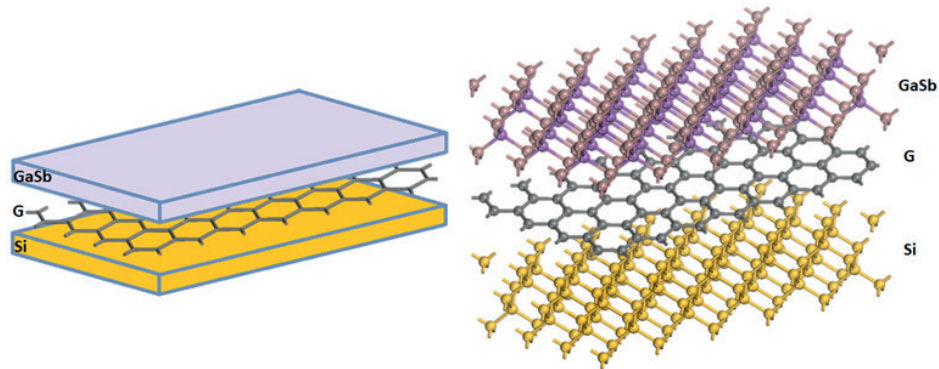


Figura 4. Representación esquemática de la estructura GaSb sobre G/Si.

El proceso de depósito de GaSb sobre G/Si para formar la estructura (GaSb/G/Si) se caracteriza por la interacción entre materiales distintos: el GaSb tridimensional o bulto (3D) y el grafeno bidimensional (2D). Esta interacción 3D(GaSb)/2D(G), mediada por las propiedades únicas de cada material, representa un nuevo método para la obtención de semiconductores III-V, específicamente el GaSb. Por su parte, el grafeno promueve enlaces tipo vdW, lo que facilita su unión con el GaSb a través de interacciones débiles vdW. Estos enlaces son aproximadamente dos órdenes de magnitud más débiles en comparación con los enlaces covalentes presentes en las interfaces 3D/3D, como por ejemplo en el caso de GaSb/Si. Como resultado, los enlaces vdW entre GaSb/G tienen la capacidad de liberar fácilmente las tensiones causadas por las diferentes constantes de red y coeficientes de dilatación térmica de GaSb y Si en la estructura GaSb/G/Si. En consecuencia, la calidad cristalina del GaSb y en general de los semiconductores III-V es alta, usando este enfoque innovador.

### Aplicaciones de la integración

La integración de los materiales III-V y los materiales 2D en la tecnología del silicio está abriendo nuevas oportunidades para el desarrollo de dispositivos con funciona-

lidades avanzadas que no eran posibles con el silicio (An, 2022). Una de estas ventajas es el aumento de la movilidad electrónica, lo que permite que los dispositivos sean mucho más rápidos y, por lo tanto, que se puedan implementar en sistemas que demandan respuestas rápidas, como las tarjetas gráficas, las pantallas y dispositivos de comunicación óptica.

Los materiales 2D han encontrado aplicaciones en una variedad de dispositivos, desde LEDs, moduladores ópticos, fotodetectores y hasta celdas solares (An, 2022). Además, la electrónica basada en estos materiales está en pleno desarrollo gracias a la alta movilidad que ofrecen. Particularmente, el grafeno, ofrece propiedades versátiles que pueden ser aprovechadas de diversas maneras según su integración y función en conjunción con otros materiales. Por ejemplo, la Figura 5 (a) presenta la estructura de una celda solar basada en GaSb, donde la unión p-n facilita la separación de los pares electrón-hueco generados por la absorción de la luz. Sin embargo, el emisor de GaSb tipo p suele presentar una resistencia superficial o mejor conocida como resistencia de hoja, la cual es elevada y su valor limita la eficiencia de la celda solar pues cuantifica la facilidad con la que los portadores pueden desplazarse sobre la

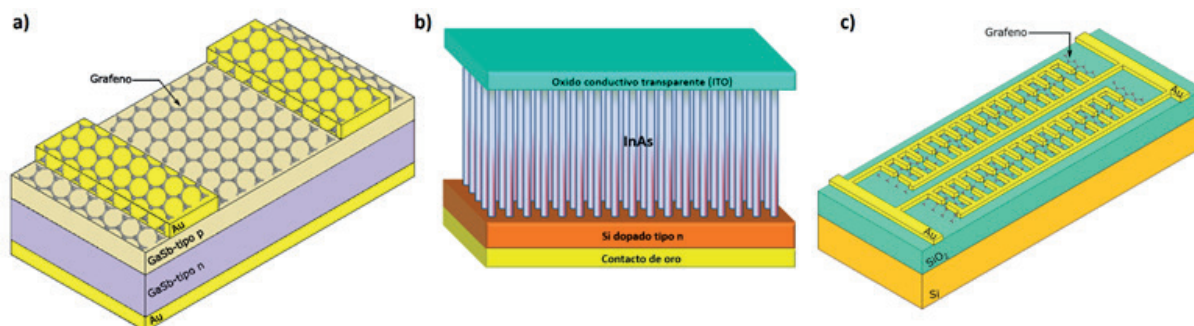


Figura 5. (a) Diodo emisor de luz GaSb y grafeno, (b) fotodetector de columnas de InAs sobre Si, y (c) fotodetector de SiO<sub>2</sub>/Si y grafeno.

superficie hasta alcanzar el contacto eléctrico. Esta limitación se ha superado mediante el recubrimiento de la estructura con una capa de grafeno, ya que reduce la resistencia eléctrica superficial, y gracias a su alta transparencia, no afecta la absorción de luz en la unión (Conlon, 2017).

Otro dispositivo cuyo funcionamiento resulta muy interesante es el fotodetector de luz, cuya función está enfocada en la detección de la intensidad luminosa para una longitud de onda específica. Los fotodetectores tienen aplicaciones en las cámaras de nuestros teléfonos, en la fabricación de detectores de gases e incluso en sistema de termografía para aplicaciones médicas. Recientemente se ha logrado la integración de InAs, que es un semiconductor III-V, con la tecnología del silicio para la optimización de fotodetectores. La figura 5 (b) presenta la integración de estas dos tecnologías, en donde se han incorporado un arreglo de nanocolumnas de InAs, sobre un sustrato de silicio tipo n y se ha cubierto la estructura con un óxido conductor transparente, que funciona como electrodo. La luz por detectar puede atravesar este electrodo y es completamente absorbida por el arreglo de nanocolumnas de InAs debido a sus excelentes propiedades antirreflejantes. La integración de las

propiedades físicas de estos semiconductores con la tecnología del silicio permitirá alcanzar novedosas aplicaciones en muchas áreas del conocimiento.

Un tercer dispositivo que es ampliamente utilizado en sensores y equipos de medición son los fotodetectores que absorben radiación electromagnética y la convierten en una señal eléctrica relacionada con el parámetro físico a medir. Estos dispositivos se emplean en el desarrollo de sensores de movimiento, sensores de visión infrarroja y fotodetectores con aplicaciones biomédicas. Para este propósito, se necesitan materiales que presenten una buena absorción óptica en la región de la longitud de onda deseada, así como la capacidad de proporcionar variaciones eléctricas altamente sensibles a la luz. La Figura 5 (c) ilustra un fotodetector en el que se ha incorporado una monocapa de grafeno entre la capa dieléctrica de SiO<sub>2</sub> y los contactos eléctricos para mejorar la sensibilidad de detección. Esta inclusión ha permitido desarrollar fotodetectores con una respuesta ultra rápida, superando significativamente a los dispositivos comerciales basados en silicio o germanio.

## Referencias

An, J. Z. Perspectives of 2D materials for optoelectronic integration. *Advanced*

*Functional Materials*, 32[14], pp. 2110119, 2022. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adfm.202110119>

Casallas-Moreno, Y. L.-M.-L.-F.-H.-G.-Á. Growth mechanism and physical properties of the type-I In<sub>0.145</sub>Ga<sub>0.855</sub>As<sub>y</sub>Sb<sub>1-y</sub>/GaSb alloys with low As content for near infrared applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 808, pp.151690, 2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838819329238>

Chi-Tai Wang, C.-S. C. Competitive strategies for Taiwan's semiconductor industry in a new world economy. *Technology in Society*, 36, pp.60-73, 2014. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X13000870>

Conlon, B. P. Performance of GaSb Photovoltaics with Graphene Coating. *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, pp.219-221, 2017. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8366632>

González-Morales, M. A.-M.-B.-L.-R.-F.-P. Determination of lateral strain in InGaAsSb alloys and its effect on structural and optical properties. *Journal of Materials Science*, 58[41], pp.16172-16183, 2023. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-023-08991-6>

Manzo, S. S. Pinhole-seeded lateral epitaxy and exfoliation of GaSb films on graphene-terminated surfaces. *Nature communications*, 13[1], pp.4014, 2022. <https://www.nature.com/articles/s41467-022-31610-y>

Xiaoyue Wang, C. L. Three-dimensional transistors and integration based on low-dimensional materials for the post-Moore's law era. *Materialstoday*, 63, pp.170-187, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702122003236>

Zeng, A. The Development of Photolithographic Technology and Machines. *SHS Web of Conferences*, 163, pp.03021, 2023. [https://www.shs-conferences.org/articles/shsconf/pdf/2023/12/shsconf\\_ics-sed2023\\_03021.pdf](https://www.shs-conferences.org/articles/shsconf/pdf/2023/12/shsconf_ics-sed2023_03021.pdf)



# Ciencia e Ingeniería de la Inteligencia Artificial

**Ing. Matthieu Olague**  
*IBM Technology Campus Guadalajara*

**Dr. Gustavo Olague**  
*Centro de Investigación Científica y de Educación Superior  
de Ensenada, Baja California, (CICESE)*

## Resumen

La Inteligencia Artificial (IA) no es sólo un concepto sino una realidad que nos rodea permanentemente. Cada día, desde el momento en que nos levantamos, nos encontramos con tecnología que facilita nuestras más diversas tareas.

En particular, el teléfono celular se ha convertido en un dispositivo en el que realizamos innumerables actividades como: escuchar música, escribir correos electrónicos, analizar una hoja de cálculo, filmar videos o editar fotografías para compartirlas en nuestras redes sociales. Definir la inteligencia artificial puede convertirse rápidamente en un desafío debido a la gran variedad de propuestas que intentan resolver las actividades mencionadas anteriormente.

Además, innumerables profesionales se dedican a generar soluciones prácticas a tareas de IA. Podemos empezar a entender este campo de conocimiento preguntándonos, ¿cuál es el proceso mediante el cual se crean todas estas tecnologías? Básicamente podemos referirnos a dos de ellos: el método científico y el método de la ingeniería.

**Palabras clave:** Inteligencia artificial, Método científico, Método de la ingeniería, Tipos de razonamiento.

## Abstract

Artificial Intelligence (AI) is not only a concept but a reality that surrounds us permanently. Each day, from the moment we wake up, we encounter technology that facilitates our most diverse chores.

In particular, the cellphone has come to be a device in which we perform countless activities such as: listening to music, writing

emails, analyzing a spreadsheet, filming videos, or editing photographs so that we can share them on our social media. Defining artificial intelligence can quickly become a challenge due to the vast array of proposals that try to solve the activities mentioned above.

Besides, countless professionals dedicate themselves to generating practical solutions to AI tasks. We can start grasping this field of knowledge by asking ourselves, what is the process by which all these technologies are created? We can basically refer to two of them: the scientific method and the engineering method.

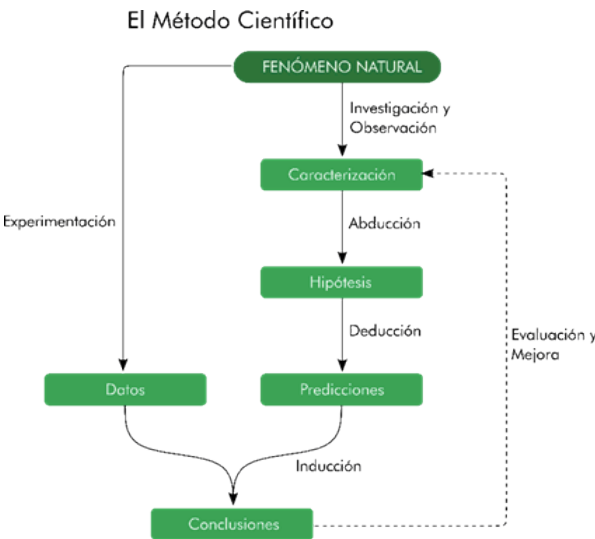
**Keywords:** Artificial intelligence, Scientific method, Engineering method, Types of reasoning.

## El método científico

El método científico es un procedimiento exploratorio que se basa en un conjunto de principios para describir el mundo que nos rodea (Gauch, 2003). La figura 1 muestra cómo podemos usar estos principios para sacar conclusiones de fenómenos naturales mediante la caracterización, el razonamiento y la experimentación. En primer lugar, al indagar e inspeccionar el mundo, los científicos son capaces de realizar caracterizaciones de la realidad. Esto incluye aprovechar perspectivas filosóficas e históricas para tener la visión más completa posible sobre el tema en cuestión.

La investigación y observación de fenómenos naturales constituye un pilar de la ciencia, pues son a partir de estas prácticas que podemos formular preguntas que aportan conocimiento. En la medida que un investigador sea capaz de recopilar una mayor cantidad de información confiable sobre





*Figura 1. Una abstracción de los principios del método científico y las conexiones entre ellos. Por un lado, los científicos siguen un procedimiento para caracterizar la naturaleza y formular hipótesis y predicciones a partir de sus observaciones utilizando razonamientos abductivos y deductivos. Paralelamente, se obtienen datos del mundo real mediante experimentación, que luego se utilizan para probar predicciones y formar conclusiones mediante razonamiento inductivo. El método científico se considera un proceso cíclico porque la formulación de nuevos conocimientos depende de la evaluación y mejora de las caracterizaciones existentes de la realidad.*

un fenómeno, este contará con más recursos para encontrar posibles explicaciones a eventos. Este proceso de búsqueda de justificaciones es conocido como razonamiento abductivo, en donde se parten de observaciones para generar reglas, denominadas hipótesis en el ámbito científico (Sebeok y Umiker-Sebeok, 1979). La abducción es para los seres humanos un acto natural, pues es algo que realizamos continuamente y de forma inconsciente. Haciendo uso de la imaginación y el instinto somos capaces de crear declaraciones que explican de forma

lógica un acontecimiento.

Supongamos que un científico ha estado tratando de entender cómo es que los seres humanos son capaces de sacar conclusiones válidas, para esto ha planteado la pregunta: ¿Cuáles son las reglas formales para sacar conclusiones válidas? Después de investigar y conocer las explicaciones aceptadas por la comunidad, este científico busca hacer crecer la frontera del conocimiento al proponer una nueva hipótesis. ¡A partir de su experiencia, ha logrado crear una explicación totalmente nueva!

Para poner a prueba esta nueva regla, se generan predicciones de casos observados utilizando un razonamiento deductivo. Esto es, partiendo de un caso base y una regla general, se puede especular sobre el resultado o desenlace. De esta forma, el objetivo de esta secuencia de pasos es encontrar fundamentos que expliquen o complementen mejor las ideas existentes sobre un tema.

De forma paralela, el científico en cuestión realizará una serie de pasos que le permitirá validar su hipótesis. A través de un proceso de experimentación se lograrán recopilar datos del mundo real, mismos que se contrastarán con las predicciones para formar conclusiones mediante el razonamiento inductivo. Este tipo de razonamiento parte de un caso base y un resultado para generar una fórmula general, de modo que al comparar esta fórmula con la hipótesis original, se podrán llegar a conclusiones que refuercen la caracterización del fenómeno estudiado.

En este sentido, los científicos dependen de los avances de los ingenieros para disponer de los medios necesarios para probar con éxito sus hipótesis. En el caso de la inteli-

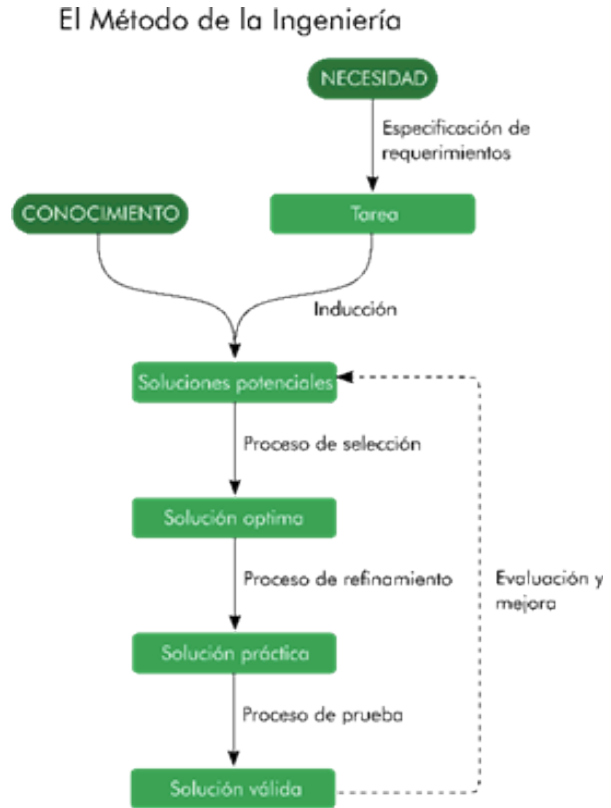


gencia artificial, los avances en las capacidades de computación han permitido a los científicos mejorar y aumentar su comprensión sobre la inteligencia en los seres humanos y cómo reproducirla en máquinas. Un ejemplo palpable de esta simbiosis entre ciencia e ingeniería podemos encontrarlo en el caso planteado anteriormente, sobre las reglas formales para sacar conclusiones válidas. Aquí, los científicos formulan la pregunta sobre las reglas que rigen el razonamiento válido, y los ingenieros utilizan las capacidades computacionales para revisar literatura, recopilar datos y analizar reglas lógicas con el fin de proporcionar respuestas sólidas. La aplicación de métodos científicos respaldados por el poder computacional demuestra cómo la colaboración entre científicos e ingenieros impulsa el progreso y la comprensión en campos cruciales como la inteligencia artificial, destacando la necesidad continua de avances en ambas disciplinas para avanzar en nuestro entendimiento del mundo y la tecnología.

Por esta razón, el método científico es visto como un proceso cíclico, donde las conclusiones inductivas pueden utilizarse para evaluar y mejorar las caracterizaciones existentes de la realidad, contribuyendo a la formulación de nuevos conocimientos.

### El método de la ingeniería

El método de la ingeniería, también conocido como proceso de diseño de ingeniería, es un medio por el cual se crean productos y procesos funcionales con el objetivo de resolver problemas de la manera más factible y viable (Pahl y Beitz, 1996). Así como los científicos caracterizan los fenómenos naturales para generar conocimiento, los ingenieros utilizan el conocimiento para diseñar soluciones a los problemas. De manera similar, mientras los científicos están



*Figura 2. Una abstracción de los principios elementales del método de la ingeniería y las conexiones entre ellos.*

*Los ingenieros comienzan definiendo una tarea que resuelve una necesidad ajustándose a especificaciones del diseño. Luego se inducen posibles soluciones a partir de la tarea y del conocimiento disponible del área. Si existe una solución óptima, se refina hasta convertirla en una solución práctica y finalmente se valida mediante un procedimiento de prueba. Los resultados se pueden utilizar para evaluar y mejorar nuevas soluciones.*

limitados por los datos a fin de probar o refutar sus ideas, las soluciones de los ingenieros están acotadas a los requisitos.

Existen ciertos trabajos de ingeniería que comparten una mayor similitud con el método científico, como es el caso de la

investigación aplicada. Si bien ambos poseen una fase de experimentación y los resultados se comparten de forma similar mediante publicaciones, los objetivos de ambos trabajos son fundamentalmente distintos. En la investigación aplicada se buscan resolver problemas o planteamientos específicos, ya sea mejorando un procedimiento existente o proponiendo una nueva solución. Nótese que, en este caso, la meta final ya no consiste en caracterizar un fenómeno natural, sino que se busca aplicar el conocimiento adquirido para generar una solución que satisfaga una necesidad. Comprendiendo nuestra relación con la generación de conocimiento y la creación de soluciones podemos conocer y educar de mejor forma sobre el impacto e importancia de los trabajos desarrollados. La figura 2 muestra una forma de comprender el flujo de trabajo de este proceso a través de un conjunto elemental de principios que pueden adaptarse al contexto particular de cada problema.

A partir de una tarea bien definida, un ingeniero comenzará imaginando posibles soluciones basadas en el conocimiento y la información disponibles sobre el tema. Mediante un procedimiento de selección se elegirá la solución óptima que mejor se ajuste a los requisitos. Si no se encuentra una solución factible o viable, entonces la tarea debería redefinirse o detenerse por completo. Tras la decisión, si se encuentra una solución, se pasará por un proceso de perfeccionamiento a partir del cual se presentará una solución práctica. Finalmente, la solución debe validarse mediante una estrategia de prueba adecuada.

El proceso de diseño de ingeniería, similar al método científico, también es una metodología cíclica; ya que se pueden utilizar

soluciones válidas para evaluar y mejorar nuevas soluciones potenciales. Asimismo, el trabajo de ingeniería es elemental en el desarrollo de la sociedad pues es a partir de sus principios que somos capaces de aterrizar el conocimiento desarrollado por científicos en procesos útiles que mejoran la calidad de vida de las personas.

Puesto que el desarrollo de productos funcionales es una tarea de gran complejidad, se puede llegar a dividir el trabajo de ingeniería en distintas fases. Mostraremos en un ejemplo posterior cómo el método de la ingeniería puede aplicarse secuencialmente para producir un producto final a partir de una cadena de soluciones válidas interconectadas.

### **Ciencia e ingeniería de la IA**

En las dos secciones anteriores, hemos propuesto ideas que nos ayudaron a diferenciar los métodos científicos y de ingeniería. Ahora usaremos estas definiciones para construir un panorama general de los roles, limitaciones e interacciones entre estos procesos, utilizando la IA como guía.

Comencemos con un fenómeno natural como la inteligencia humana. Podemos reflexionar sobre él y observarlo desde diferentes perspectivas (Russell y Norvig, 2010). Un filósofo podría preguntarse: ¿Se pueden utilizar reglas formales para sacar conclusiones válidas? ¿Cómo surge la mente a partir de un cerebro físico? ¿De dónde viene el conocimiento? Por otro lado, un matemático podría estar más interesado en: ¿Cuáles son las reglas formales para sacar conclusiones válidas? ¿Qué se puede calcular? ¿Cómo razonamos con información incierta? A través del método científico podemos encontrar y validar sistemáticamente explicaciones a estas preguntas y

constituir así un cuerpo de conocimientos sobre el tema. Nótese que, si bien la ciencia sirve como brecha entre disciplinas, se limita a describir y caracterizar la naturaleza.



*Figura 3. Un panorama general sobre el papel de la ciencia y la ingeniería en la inteligencia artificial. Inspirándose en la naturaleza, la humanidad es capaz de generar ideas cada vez más refinadas mediante la aplicación iterativa y secuencial de los métodos científico y de ingeniería.*

Si nuestro objetivo va más allá de la comprensión de la naturaleza y, en cambio, intentamos encontrar soluciones a los problemas, entonces comenzaremos a entrar en el dominio de la ingeniería. De acuerdo con la figura 3, podemos observar que más cerca de donde termina el ámbito de la ciencia, nos encontraremos con el campo de la investigación aplicada. En esta sección, se utiliza el método de la ingeniería para aprovechar conocimiento de la ciencia con el fin de diseñar soluciones con objetivos prácticos. Publicaciones como (Dechter, 1986) y (Korf, 1982) son excelentes ejemplos de cómo la investigación aplicada puede ex-

traer conocimiento de la ciencia y utilizarlo para encontrar soluciones muy creativas y apasionantes que contribuyan a la IA.

En la sección anterior, mencionamos que el método de la ingeniería podría usarse en secuencia para producir soluciones cada vez más refinadas. Siguiendo el orden de la figura 3, observamos que podemos usar el método de ingeniería una vez más, pero esta vez para producir productos funcionales inspirados en un conjunto de soluciones diseñadas. Este proceso se ejemplifica en el campo de la inteligencia artificial, donde la investigación y desarrollo continuo lideran a la creación de soluciones robustas.

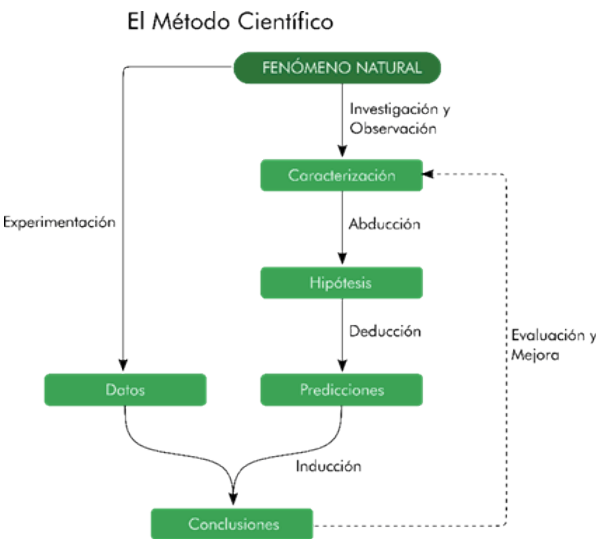
Para ilustrar este concepto, consideremos un grupo de ingenieros dedicados a mejorar un sistema de recomendación en una plataforma de transmisión de video. A través de la investigación activa, la experimentación y la colaboración interna, se generó un cuerpo de soluciones que no solo abordaron el problema específico, sino que también contribuyeron al conocimiento general del campo. La fase de desarrollo de producto resultante aprovechó estas soluciones refinadas, utilizando el método de ingeniería para integrar y adaptar estos avances en un sistema funcional que satisface las necesidades cambiantes de los usuarios. Un ejemplo destacado en este contexto es OpenAI, una empresa que ha capitalizado el progreso de la investigación en el aprendizaje profundo para crear soluciones innovadoras como ChatGPT, demostrando cómo la ingeniería secuencial puede dar paso a productos avanzados que tienen un impacto significativo en el mundo. Otro producto destacado serían programas para corregir texto; por ejemplo Grammarly, el cual está basado en el



lenguaje LISP que es un clásico del paradigma de programación simbólico.

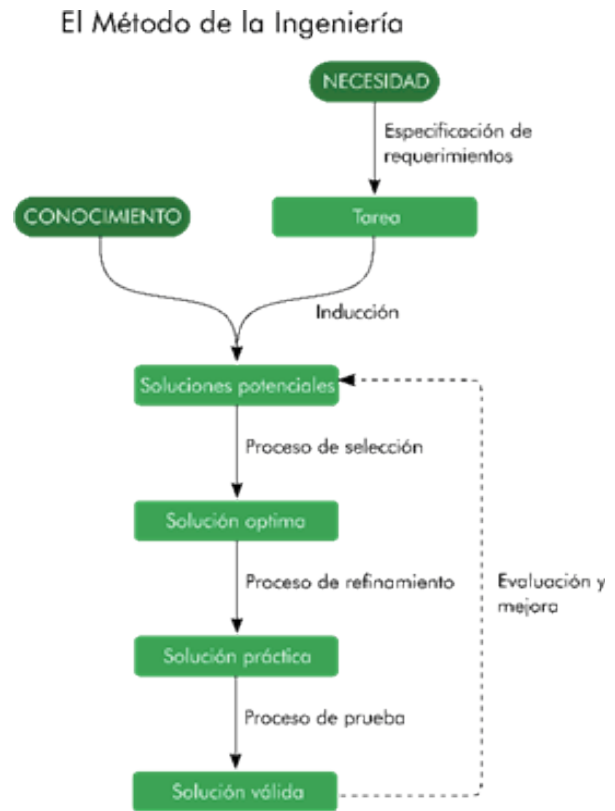
De esta manera, podemos ver cómo la ciencia y la ingeniería desempeñan cada una un papel crucial en el avance de nuestra sociedad. La naturaleza inspira a los científicos a caracterizar el mundo, lo que a su vez inspira a los ingenieros a crear soluciones a los problemas; Podemos empezar a ver desde el panorama general de este proceso algo que se asemeja a una cascada de ideas cada vez más refinadas. Ya seas estudiante, profesional o entusiasta, ¿cómo te gustaría contribuir a esta cadena de valores?

**Anexos Figuras**



**Título:** Figura 1  
**Archivo:** ScientificMethod.eps  
**Descripción:** Una abstracción de los principios del método científico y las conexiones entre ellos. Por un lado, los científicos siguen un procedimiento para caracterizar la naturaleza y formular hipótesis y predicciones a partir de sus observaciones utilizando razonamientos abductivos y de-

ductivos. Paralelamente, se obtienen datos del mundo real mediante experimentación, que luego se utilizan para probar predicciones y formar conclusiones mediante razonamiento inductivo. El método científico se considera un proceso cíclico porque la formulación de nuevos conocimientos depende de la evaluación y mejora de las caracterizaciones existentes de la realidad.



**Título:** Figura 2  
**Archivo:** EngineeringMethod.eps  
**Descripción:** Una abstracción de los principios elementales del método de la ingeniería y las conexiones entre ellos. Los ingenieros comienzan definiendo una tarea que resuelve una necesidad ajustándose a especificaciones del diseño. Luego se inducen posibles soluciones a partir de la tarea y del conocimiento disponible del área. Si existe una solución óptima, se refina hasta convertirla en una solución

práctica y finalmente se valida mediante un procedimiento de prueba. Los resultados se pueden utilizar para evaluar y mejorar nuevas soluciones.



**Título:** Figura 3


**Archivo:** ScienceEngineering.eps

**Descripción:** Un panorama general sobre el papel de la ciencia y la ingeniería en la inteligencia artificial. Inspirándose en la naturaleza, la humanidad es capaz de generar ideas cada vez más refinadas mediante la aplicación iterativa y secuencial de los métodos científico y de ingeniería.

## Referencias

- Dechter, R., Learning While Searching in Constraint-Satisfaction-Problems, Proceedings of the Fifth National Conference on Artificial Intelligence, AAAI'86, pp. 178–185, 1986.
- Gauch, H. G. Jr., Scientific Method in Practice, Cambridge University Press, 2003.
- Korf, R. E., A Program That Learns to Solve Rubik's Cube, Proceedings of the Second AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI'82, pp. 164–167, 1982.
- Pahl, G. y Wolfgang B., Engineering Design: A Systematic Approach, Springer London, 1996.
- Russell, S. y Peter N., Artificial Intelligence: A Modern Approach, 3ra ed., Prentice Hall, 2010.
- Sebeok, T. A. y Jean U., "You Know My Method": A Juxtaposition of Charles S. Peirce and Sherlock Holmes, Semiotica, 1979.





# Emisiones de CO<sub>2</sub> en exceso por consumo de combustible en vehículos ligeros

**MBA. Fernando Pérez Márquez**  
**M.I. Azucena del Rosario Fraire Vázquez**  
*Tecnológico Nacional de México/ITS de Comalcalco*  
*Subdirección de Posgrado e Investigación*  
**M.G.A. Raúl Enrique Islas Jesús**  
*Tecnológico Nacional de México/ITS de Comalcalco*  
*Subdirección de Posgrado e Investigación*  
**M.S.I.G. Maritza Peralta Fuentes**  
**SURPETROL**  
*Higiene, Seguridad, Ambiente y Calidad*



## Resumen

El uso de vehículos automotores ofrece beneficios a la sociedad en términos económicos y de movilidad, pero las emisiones producidas a partir de la quema de sus combustibles representan hoy en día un problema global derivado de los gases de efecto invernadero. Dentro de los gases que son de mayor preocupación ambiental se encuentra el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En el presente trabajo se calcularon las emisiones de dióxido de carbono en exceso que se generan por vehículos ligeros al circular bajo condiciones mecánicas y hábitos de conducción diferentes a los recomendados por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Se consideró un método cuantitativo, con un diseño descriptivo de tipo no experimental, con muestreo no probabilístico y recolección de datos de forma transversal. Se utilizaron factores de emisión y bases de cálculo mencionadas en el Portal Eco-vehículos. Se logró la recolección de datos de 169 conductores con vehículos de diferentes marcas y su validación conforme a la información propuesta por el Portal antes mencionado. Se procesaron los datos con el software Excel®. Se cuantificaron el total de emisiones y sus respectivos indicadores. El estudio se vio limitado por la información técnica disponible sobre rendimientos de combustible de vehículos de modelos previos al año 2008, por lo que se ajustó la muestra a los modelos disponibles. La investigación genera valor al proporcionar y aplicar una metodología particular para cuantificar las emisiones tanto en parques vehiculares pequeños como de forma masiva. Se determinó que cada vehículo emite en exceso 468.17 kilogramos de dióxido de carbono por cada 15000 kilómetros, lo que equivale a 200.79 litros de gasolina.

Afinación deficiente es la causa más frecuente para condiciones mecánicas y el tiempo de calentamiento en vacío para hábitos de conducción, con 72.2 % y 87 % de los casos, respectivamente.

**Palabras clave:** Consumo de combustible, conducción ecológica, emisiones de dióxido de carbono, factor de emisión.

## Abstract

The use of motor vehicles offers benefits to society in economic and mobility terms, but the emissions produced from the burning of their fuels represent today a global problem derived from greenhouse gases. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is among the gases that are of greatest concern in terms of the environment. In this work, the excess carbon dioxide emissions produced by light vehicles when circulating in mechanical conditions and driving habits different from those recommended by Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía were calculated. A quantitative method with a non-experimental descriptive design, non-probabilistic sampling and cross-sectional data collection was considered. Emission factors and calculation bases from the Portal Eco-vehículos were used. The data collection of 169 drivers with vehicles of different brands was achieved, which were verified according to the information of the aforementioned Portal. The data was processed with Excel® software. Total emissions and their respective indicators were quantified. The study was limited by available technical information about fuel efficiency of pre-2008 model year vehicles, so the sample was adjusted for available models. Research creates value by providing and applying a specific methodology for quantification emissions in both small

and massive vehicle fleets. It was determined that each vehicle emits an excess of 468.17 kilograms of carbon dioxide per 15000 km, which is equivalent to 200.79 liters of gasoline. Poor tuning is the most frequent cause for mechanical conditions, while the vehicle's idling warm-up time for driving habits, with values of 72.2 % and 87 % of cases, respectively.

**Keywords:** Fuel consumption, ecological driving, carbon dioxide emissions, emission factor.

### Introducción

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es uno de los contaminantes más frecuentes dentro de los miles de millones de contaminantes generados cada año, entre otras cosas, por actividades industriales, uso de calefacciones y aumento de uso de vehículos (Sánchez Ruiz & Solís Fraile, 2020). El CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera se incrementa cada vez más con el paso del tiempo. La concentración de este gas era de 280 ppm antes de la Revolución Industrial, mientras que para 2018 era de 407.8 ppm y en 2021 alcanzó las 415 ppm (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021).

Los vehículos automotores son empleados para el desarrollo de las actividades tanto cotidianas como industriales, incrementando así el nivel de contaminación en la atmósfera y afectando a la población mundial. La combustión que se lleva a cabo en los vehículos genera diferentes contaminantes, dentro de ellos el vapor de agua y el dióxido de carbono, en mayor medida. A pesar de que los contaminantes antes mencionados no son residuos tóxicos, el dióxido de carbono emitido en grandes cantidades a la atmósfera provo-

ca el efecto invernadero, lo cual ha propiciado el incremento en las normativas para regular las cantidades de este gas que fomentan la adopción de tecnologías que incluyen fuentes de energía menos contaminantes. Para los próximos años se espera una implantación progresiva de dichas tecnologías en los automóviles (Barrera Doblado & Ros Marín, 2017).

El término ecodriving describe los comportamientos durante la conducción que permiten incrementar la eficiencia energética de los vehículos. Así, el comportamiento del conductor tiene como consecuencia un impacto positivo clave para alcanzar la sustentabilidad (Stanton, Landry, Di Bucchianico, & Vallicelli, 2017). La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) menciona una serie de recomendaciones que contribuyen al ahorro de combustible y, por consiguiente, la disminución en las emisiones a la atmósfera; dentro de ellas: evitar calentar el motor cuando el vehículo no está en movimiento; realizar aceleraciones graduales, evitando pisar el acelerador a fondo; anticiparse a situaciones de frenado y aceleración; cambiar a velocidad superior siempre que el sistema motriz lo permita (en transmisión manual); mantener una actitud positiva ante el volante, sin apresurarse y teniendo una conducción suave y segura; usar ventanillas cerradas al conducir en carretera, siempre que sea posible; registrar gastos de combustible para controlar consumos e identificar anomalías; y dar un buen mantenimiento al vehículo, evitando la combustión incompleta (CONUEE, 2015a).

Las instituciones educativas y los medios de comunicación orientan a la sociedad que

el uso de vehículos automotores provoca contaminación al ambiente; sin embargo, no todos conocen claramente la cantidad de emisiones (y de qué tipos) se generan por el uso de dichos vehículos. La CONUEE muestra información relacionada a las cantidades y tipos de emisiones que los vehículos automotores generan a la atmósfera e incluye recomendaciones a los automovilistas para que disminuyan el uso innecesario de combustibles, lo que se traduce en una mejora económica para ellos y en una disminución de emisiones a la atmósfera.

La cantidad de emisiones de dióxido de carbono que genera cada vehículo en circulación puede ser muy distinta de un usuario a otro, y de un lugar a otro, pero es importante identificar, más allá de lo convencionalmente mostrado por la CONUEE, las cantidades de emisiones que se pueden producir a causa de inadecuados hábitos de conducción y condiciones mecánicas de los vehículos.

Existen numerosos factores que ayudan a la reducción de emisiones de los vehículos automotores y que están directamente relacionados con el consumo de combustible. Diversos autores han escrito acerca de la importancia de mantener las llantas en una presión adecuada ya que pueden contribuir positivamente al incremento en el rendimiento de combustible de los vehículos. Dentro de las medidas a considerar para reducir el consumo de combustible, se encuentran el diseño aerodinámico del vehículo, las llantas con menor resistencia al rodamiento, mantener el nivel de presión de las llantas en condiciones óptimas y mejoras en los termostatos del sistema de aire acondicionado (Dammert Lira & García C., 2020).

La CONUEE publica de forma regular los rendimientos de combustible de cada una de las marcas y modelos de vehículos automotores. Por ejemplo, a través de la página oficial del Gobierno de México muestra los catálogos de rendimiento de combustible en vehículos ligeros de venta en México para modelos desde 2010 a 2021. Además, dentro de los catálogos menciona recomendaciones para ahorrar combustible en el automóvil e indica las cantidades de emisiones de dióxido de carbono de acuerdo con la marca y modelo del vehículo en g/km (CONUEE, 2015b). La misma institución ha publicado también información de cómo ahorrar combustible, proporcionando videos, folletines, recomendaciones y guías, dentro de los que tiene gran importancia la denominada Guía del automovilista eficiente (CONUEE, 2015a).

Se realizó una publicación acerca de un caso de regulación de emisiones de dióxido de carbono y su equivalencia en rendimientos de combustible para vehículos ligeros nuevos en México, en la cual se concluye que la ciudadanía en general no es muy consciente de la problemática, pero que a pesar de ello resulta beneficiada a partir de normas como la NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013 (Emisiones de bióxido de carbono [CO<sub>2</sub>] provenientes del escape y su equivalencia en términos de rendimiento de combustible, aplicable a vehículos automotores nuevos de peso bruto vehicular de hasta 3,857 kilogramos) al fomentar el incremento del rendimiento del vehículo y la reducción las emisiones (Elizondo Cordeiro & Hernández Amezcua, 2018).

En un estudio realizado en la ciudad de Quito-Ecuador se comparó la conducción eficiente con respecto a la conducción nor-



mal con la finalidad de evaluar las emisiones contaminantes y la economía de combustible en un vehículo con cilindraje de 1498cm<sup>3</sup> a 2810 metros sobre el nivel del mar, concluyendo que mediante la conducción ecológica se logra una mejora en la eficiencia de autonomía de un vehículo con beneficios energéticos, ambientales y económicos (Leguísamo, Llanes Cedeño, Celi Ortega, & Rocha Hoyos, 2020).

La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), la Secretaría de Energía (SENER), la CONUEE, la Secretaría de Economía (SE) y la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO), presentaron el Portal de Indicadores de Eficiencia Energética y Emisiones Vehiculares (Portal Eco-Vehículos), en el que se muestra información sobre emisiones, rendimiento y gasto anual relacionado a vehículos ligeros nuevos y semi-nuevos, así proveen información útil a la sociedad para la toma de decisiones sobre economía y medio ambiente. Dentro de la plataforma se incluye: rendimiento de combustible del vehículo; emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>); gasto anual estimado de consumo de combustible; comparaciones entre vehículos; y ligas de interés, sitios de referencia, glosario y respuestas a preguntas frecuentes (Portal Eco-vehículos, s.f.).

Esta investigación se realizó bajo el método cuantitativo, con un diseño descriptivo de tipo no experimental, aplicando un muestro no probabilístico y recolección de datos de forma transversal. Así, se buscó determinar la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> en exceso que se generan por vehículos ligeros al circular bajo condiciones mecánicas y hábitos

de conducción diferentes a los recomendados por la CONUEE, para la determinación de los respectivos índices de contaminación.

### **Desarrollo**

La estimación de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se realizó mediante el empleo de factores de emisión y bases de cálculo ya definidos (Portal Eco-vehículos, s.f.); para ello, se desarrollaron los pasos que a continuación se describen:

#### *Paso 1.- Definición de variables*

Se definieron las variables a estimar con base en la recolección de datos de primera mano (encuesta), teniendo en cuenta que todas ellas son de tipo cuantitativas, debido al enfoque de la investigación. Dichas variables se definen en la tabla 1.

#### *Paso 2.- Diseño del cuestionario.*

Se diseñó un cuestionario en el cual se consideró la recolección de datos técnicos de vehículos ligeros, dentro de los que sobresalen: marca, submarca, año modelo, cantidad de puertas, número de cilindros, tamaño de motor (en L), potencia (en HP), transmisión y de combustible. Además, se incluyeron preguntas específicas que permitieron obtener información acerca de las condiciones mecánicas de los vehículos y hábitos de conducción bajo los cuales son operados. Como parte de la validez y confiabilidad de la información se solicitaron datos técnicos de los vehículos a los encuestados y así se garantizó la correcta identificación del rendimiento de combustible de cada uno de ellos, conforme a los valores publicados (Portal Eco-vehículos, s.f.). Los cuestionarios aplicados en los cuales se proporcionaron datos insuficientes que impidieron la identificación objetiva del rendimiento de combustible de cada unidad móvil fueron descartados.

Variable	Definición	Indicador relacionado
Litros por tiempo calentamiento en vacío	Cantidad de litros de combustible consumidos en el tiempo que tarda en funcionamiento un vehículo sin moverse de un estacionamiento	Emisiones de CO <sub>2</sub> de por calentamiento en vacío por vehículo
Litros por carga adicional en cajuela	Cantidad de litros de combustible consumidos por la carga adicional que se lleva en el vehículo fuera de sus componentes y estructura funcional original	Emisiones de CO <sub>2</sub> por carga adicional en cajuela por vehículo
Litros por afinación	Cantidad de litros de combustible consumidos por la falta de mantenimiento del vehículo, considerando afinación mayor deficiente	Emisiones de CO <sub>2</sub> por afinación deficiente por vehículo
Litros por presión incorrecta de llantas	Cantidad de litros de combustible consumidos por la falta de calibración de las llantas del vehículo	Emisiones de CO <sub>2</sub> por presión incorrecta de las llantas por vehículo
Litros por velocidad excesiva en carretera	Cantidad de litros de combustible consumidos por viajar a más de 90 km/h en carretera.	Emisiones de CO <sub>2</sub> por velocidades altas en carretera
Litros por intensidad inmoderada de aire acondicionado	Cantidad de litros de combustible consumidos por emplear el aire acondicionado con una intensidad inmoderada	Emisiones de CO <sub>2</sub> por uso inmoderado de aire acondicionado

**Nota.** Esta tabla muestra la definición de las seis variables empleadas en la investigación, al igual que los indicadores relacionados a dichas variables.

**Tabla 1.** Definición de variables empleadas en la investigación

*Paso 3.- Aplicación de la encuesta.*

Se aplicaron los cuestionarios a conductores de vehículos ligeros que transitaban en los municipios de Cárdenas, Centro, Comalcalco, Cunduacán y Paraíso, en el estado de Tabasco. Posteriormente, se describieron los resultados obtenidos conforme a los lugares de muestreo, participación por edad y sexo de los encuestados, marcas, submarcas, año, cilindraje, transmisión, tamaño de motor y potencia de los vehículos.

*Paso 4.- Validación de datos, registro y cálculo de variables.*

Se realizó el cotejo correspondiente para verificar que las unidades registradas cumplieran con los requerimientos necesarios para la obtención de datos técnicos disponibles (Portal Eco-vehículos, s.f.). Se efectuó la consulta de los rendimientos de combustible para cada uno de los vehículos para después registrarlos y procesarlos con ayuda del Software Microsoft

Variable	Fórmula
Litros por tiempo de calentamiento en vacío	$(\text{Minutos de calentamiento al día}) * (365 \text{ días}) * (0.01)$ <p>Se considera que los vehículos se emplean los 365 días del año. El 0.01 se debe a que el automóvil consume 100 mL por cada 10 minutos funcionando en vacío; es decir, 10 mL (1/100 de L) por cada minuto (CONUEE, 2015a).</p>
Litros por carga adicional en cajuela	$\left( \text{Trunc} \left( \frac{\text{kg adicionales}}{50} \right) \right) * (\text{L de combustible por cada 15000 km}) * (0.02)$ <p>Si la cantidad de kilogramos es &lt; 50, el resultado 0. El resultado del cociente de cantidad de kilogramos adicionales con 50 se trunca, por ello el texto “Trunc”. El 0.02 se debe a que por cada 50 kg extras se incrementa en un 2 % el consumo de combustible (CONUEE, 2015a).</p>
Litros por afinación deficiente	$(\text{L de combustible por cada 15000 km}) * (\text{Meses sin afinación}) * \frac{0.3}{12}$ <p>El 0.3 se debe a que se consume hasta 30 % más de combustible al presentar afinación deficiente (CONUEE, 2015a).</p>
Litros por presión incorrecta de llantas	$(\text{L de combustible por cada 15000 km}) * (0.05) * \frac{\text{meses de calibración} - 1}{\text{meses de calibración}}$ <p>El 0.05 se debe a que una presión incorrecta de las llantas incrementa el consumo de combustible en un 5 % (CONUEE, 2015a).</p>
Litros por velocidad excesiva en carretera	$(\text{L de combustible por cada 15000 km}) * 0.45 * 0.2$ <p>Aplica para vehículos que viajan a más de 90 km/h en carretera. El 0.45 tiene lugar considerando que el movimiento de un vehículo es 45 % en carretera (Portal Eco-vehículos, s.f.). El 0.2 se refiere a que viajar a más de 90 km/h, por ejemplo, a 110 km/h, se consume alrededor de 20 % más de combustible (CONUEE, 2015a).</p>
Litros por intensidad inmoderada de aire acondicionado	$(\text{L de combustible por cada 15000 km}) * 0.1$ <p>En intensidad del 1 al 6, considera “inmoderada” para valores mayores que 3. El valor de 0.1 se debe a que usar inmoderadamente el aire acondicionado consume 10 % más de combustible (CONUEE, 2015a).</p>

**Nota.** La tabla menciona las fórmulas para el cálculo de las variables empleadas en la investigación. Asimismo, describe puntualmente el origen de cada uno de los valores que se utilizan en cada una de ellas.

**Tabla 2.** Fórmulas empleadas para el cálculo de variables de exceso de consumo de combustible

Excel®. Se calculó la cantidad de litros de combustible consumidos en un año (se utilizó como base de cálculo 15,000 km) considerando las condiciones mecánicas y hábitos de conducción recomendados, y se empleó la fórmula:

$$\text{Litros de combustible} = \frac{15,000 \text{ km}}{\text{Rendimiento de combustible en } \frac{\text{km}}{\text{L}}}$$

El rendimiento de combustible utilizado en los cálculos de cada vehículo fue el ajustado (Portal Eco-vehículos, s.f.). Para determinar el valor (en L) de cada una de las



variables requeridas asociadas a la cantidad de exceso de consumo de combustible, se emplearon las fórmulas mostradas en la tabla 2.

*Paso 5. Determinación de emisiones de CO<sub>2</sub>.*

Para determinar la cantidad de CO<sub>2</sub> en exceso, primero se estimó el total de litros consumidos en exceso (por vehículo) mediante la sumatoria de los resultados de las variables mencionadas en la tabla 2, para cada vehículo. Después, el resultado (en L) de cada vehículo, se multiplicó por el factor de emisión de gasolina equivalente a 2331.65 gCO<sub>2</sub>/L (Portal Eco-vehículos, s.f.) y se dividió entre 1000 (g), para obtener los kgCO<sub>2</sub> emitidos por cada vehículo. Se realizó la sumatoria de los kgCO<sub>2</sub> de

todos los vehículos para obtener el resultado global. Posteriormente, para calcular el total de kgCO<sub>2</sub> emitidos en cada variable, se realizó la sumatoria de los valores (en L) obtenidos para cada vehículo (por variable), se multiplicó por el factor antes mencionado y se dividió con 1000 (g). El resultado de la sumatoria de las emisiones de kgCO<sub>2</sub> por vehículo es equivalente al resultado de la sumatoria de las emisiones de kgCO<sub>2</sub> por variable.

*Paso 6. Estadística descriptiva.*

Se realizó un análisis de los resultados obtenidos en kgCO<sub>2</sub> para cada variable y por cada vehículo, logrando así determinar la cantidad de CO<sub>2</sub> que se genera anualmente, según las variables estudiadas, así como sus respectivos porcentajes.

<b>Indicador</b>	<b>Fórmula</b>
Emisiones de CO <sub>2</sub> por calentamiento en vacío por vehículo	$\frac{kgCO_2 \text{ total por calentamiento en vacío de la muestra}}{\text{Tamaño de la muestra}}$
Emisiones de CO <sub>2</sub> por carga adicional en cajuela por vehículo	$\frac{kgCO_2 \text{ total por carga adicional en cajuela de la muestra}}{\text{Tamaño de la muestra}}$
Emisiones de CO <sub>2</sub> por afinación deficiente por vehículo	$\frac{kgCO_2 \text{ total por falta de afinación de la muestra}}{\text{Tamaño de la muestra}}$
Emisiones de CO <sub>2</sub> por presión incorrecta de las llantas por vehículo	$\frac{kgCO_2 \text{ total por falta de calibración en llantas}}{\text{Tamaño de la muestra}}$
Emisiones de CO <sub>2</sub> por velocidades altas en carretera	$\frac{kgCO_2 \text{ total por velocidades altas en carretera}}{\text{Tamaño de la muestra}}$
Emisiones de CO <sub>2</sub> por uso inmoderado de aire acondicionado	$\frac{kgCO_2 \text{ total por uso inmoderado de aire acondicionado}}{\text{Tamaño de la muestra}}$
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> en exceso por vehículo</b>	$\frac{kgCO_2 \text{ total en exceso de la muestra}}{\text{Tamaño de la muestra}}$

**Nota.** Esta tabla muestra las fórmulas que se utilizaron para calcular los índices de contaminación ambiental, los cuales están asociados a la tabla 1.

**Tabla 3.** Fórmulas empleadas para el cálculo de índices de contaminación ambiental por CO<sub>2</sub>

### Paso 7. Cálculo de los indicadores de emisiones.

Se calcularon los indicadores de emisiones de dióxido de carbono empleando los valores obtenidos para cada una de las variables. Para ello, se utilizaron las fórmulas mencionadas en la tabla 3.

### Discusión y análisis de resultados

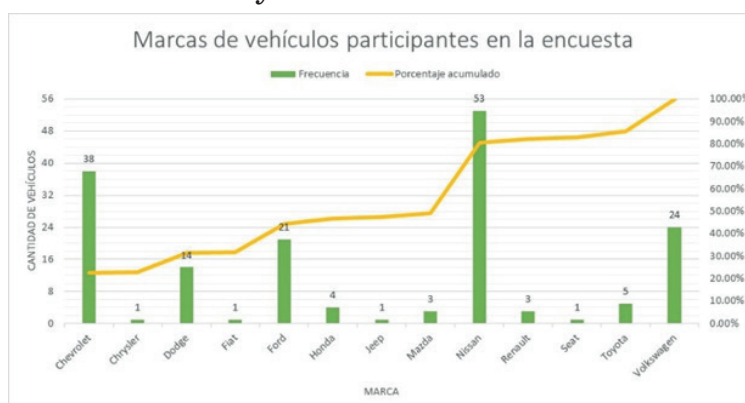
Se contabilizaron en total 169 cuestionarios de diferentes municipios del estado de Tabasco (50 en Cárdenas, 35 en Centro, 29 en Comalcalco, 25 en Cunduacán y 30 en Paraíso). De lo anterior, el 64.5 % fueron hombres y el 35.5 % mujeres. La distribución de edades fue desde los 20 hasta los 82 años, sobresaliendo 42 años con un 7.7 %. Dentro de los datos recolectados se encontraron vehículos a partir del año 2008 hasta el 2021, de las marcas Nissan, Chevrolet, Chrysler, Dodge, Fiat, Ford, Honda, Jeep, Mazda, Renault, Seat, Toyota y Volkswagen, todos con uso de gasolina como combustible. En la tabla 4 se puede observar la frecuencia para cada una de las marcas de vehículos registradas en la investigación, predominando la marca Nissan (ver figura 1) con 53 unidades móviles (31.36 %). La submarca con mayor fre-

cuencia es Sentra, con el 8.9 % de participación. Con relación al año de los vehículos, la moda la obtuvieron los modelos 2016, con el 14.2 %. El 95.3 % de los vehículos presentaron un cilindraje de 4. El tipo de transmisión predominante fue manual con el 53.8 %, seguido de la automática (43.8 %). El tamaño del motor que presentó una mayor frecuencia fue 1.6 L (33.1 %), seguido de 1.8, 2.0 y 2.5 con el 14.2 %, 12.4 % y 11.8 %, respectivamente. El rango de potencia oscila entre los 64 y los 283 HP, con una media de 129.86 HP.

Marca	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Chevrolet	38	22.49 %	22.49 %
Chrysler	1	0.59 %	23.08 %
Dodge	14	8.28 %	31.36 %
Fiat	1	0.59 %	31.95 %
Ford	21	12.43 %	44.38 %
Honda	4	2.37 %	46.75 %
Jeep	1	0.59 %	47.34 %
Mazda	3	1.78 %	49.11 %
Nissan	53	31.36 %	80.47 %
Renault	3	1.78 %	82.25 %
Seat	1	0.59 %	82.84 %
Toyota	5	2.96 %	85.80 %
Volkswagen	24	14.20 %	100.00 %
<b>Total</b>	<b>169</b>	<b>100.00 %</b>	<b>-</b>

Nota. Esta tabla señala la frecuencia para cada una de las marcas de vehículos analizadas, al igual que su porcentaje conforme al total de la muestra.

Tabla 4. Marcas de vehículos participantes en la encuesta



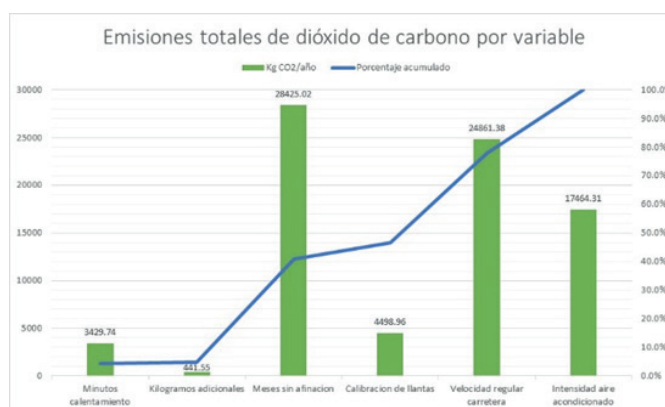
Nota. El gráfico representa las diferentes marcas de vehículos analizadas, en correspondencia a lo descrito en la tabla 4.

Figura 1. Marcas de vehículos participantes en la encuesta.

Variable analizada	Litros de combustible	kgCO <sub>2</sub> /año	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Minutos calentamiento	1470.95	3429.74	4.3 %	4.3 %
Kilogramos adicionales	189.37	441.55	0.6 %	4.9 %
Meses sin afinación	12190.95	28425.02	35.9 %	40.8 %
Calibración de llantas	1929.52	4498.96	5.7 %	46.5 %
Velocidad regular carretera	10662.57	24861.38	31.4 %	77.9 %
Intensidad aire acondicionado	7490.11	17464.31	22.1 %	100.0 %
<b>Total</b>	<b>33933.46</b>	<b>79120.96</b>	<b>100.0 %</b>	-

**Nota.** Esta tabla menciona la cantidad de combustible que se consume y la masa de CO<sub>2</sub> que se produce para cada una de las variables estudiadas, al igual que sus porcentajes con relación al total de emisiones.

**Tabla 5.** Emisiones de CO<sub>2</sub> por vehículo al año



**Nota.** Este gráfico representa los valores mencionados en la tabla 5 acerca de las emisiones de CO<sub>2</sub> calculadas para cada variable.

**Figura 2.** Emisiones totales de CO<sub>2</sub> por vehículo al año.

Se analizaron los resultados obtenidos en kgCO<sub>2</sub> para cada variable y por cada vehículo. En la tabla 5 se puede observar la cantidad de CO<sub>2</sub> que se genera anualmente, según las variables estudiadas (ver figura 2), obteniendo un total de emisiones para la muestra equivalente a 79120.96 kgCO<sub>2</sub>/año.

De la aplicación de las fórmulas de la tabla 3, se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 6, la cual incluye el total de emisiones de CO<sub>2</sub> en exceso por vehículo.

La cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> generada en exceso anualmente por cada vehícu-

lo (468.17 kgCO<sub>2</sub>) representa el 15.21 % adicional del valor que el vehículo debería emitir bajo condiciones mecánicas y hábitos de conducción recomendados (Portal Eco-vehículos, s.f.), teniendo en cuenta que la media bajo condiciones esperadas equivale a 3,077.44 kgCO<sub>2</sub>/(vehículo\*año) como se puede observar en la tabla 7. De ello, es posible identificar que se consumen en exceso 200.79 L de combustible anualmente por cada vehículo, lo que equivale a 468.17 kgCO<sub>2</sub>/(vehículo\*año).

En la tabla 7 se indica que existen conductores que mantienen y emplean los



<b>Indicador</b>	<b>Resultado</b>
Emisiones de CO <sub>2</sub> por calentamiento en vacío por vehículo	20.29 kgCO <sub>2</sub>
Emisiones de CO <sub>2</sub> por carga adicional en cajuela por vehículo	$\frac{\text{vehículo} * \text{año}}{2.61 \text{ kgCO}_2}$
Emisiones de CO <sub>2</sub> por afinación deficiente por vehículo	$\frac{\text{vehículo} * \text{año}}{168.20 \text{ kgCO}_2}$
Emisiones de CO <sub>2</sub> por presión incorrecta de las llantas por vehículo	$\frac{\text{vehículo} * \text{año}}{26.62 \text{ kgCO}_2}$
Emisiones de CO <sub>2</sub> por velocidades altas en carretera	$\frac{\text{vehículo} * \text{año}}{147.11 \text{ kgCO}_2}$
Emisiones de CO <sub>2</sub> por uso inmoderado de aire acondicionado	$\frac{\text{vehículo} * \text{año}}{103.34 \text{ kgCO}_2}$
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> en exceso por vehículo</b>	<b><math>\frac{\text{vehículo} * \text{año}}{468.17 \text{ kgCO}_2}</math></b>

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados de los indicadores calculados conforme a las fórmulas mencionadas en la tabla 3.

**Tabla 6.** Índices de contaminación ambiental por CO<sub>2</sub> emitido por condiciones mecánicas y hábitos de conducción diferentes a los recomendados por la CONUEE.

	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>
<i>Emisiones esperadas bajo condiciones mecánicas y hábitos de conducción conforme a lo recomendado por la CONUEE</i>				
Litros de combustible en 15000 km (L)	857.14	2392.34	1319.86	287.92
Emisiones de dióxido de carbono $\left(\frac{\text{kgCO}_2}{\text{vehículo} * \text{año}}\right)$	1998.56	5578.11	<b>3077.44</b>	671.33
<i>Emisiones excesivas bajo condiciones mecánicas y hábitos de conducción diferentes a lo recomendado por la CONUEE</i>				
Litros de combustible en 15000 km (L)	0	566.51	200.79	112.18
Emisiones de dióxido de carbono $\left(\frac{\text{kg CO}_2}{\text{vehículo} * \text{año}}\right)$	0	1320.89	<b>468.17</b>	261.55

**Nota.** Esta tabla muestra un comparativo de las emisiones que se generarían si se tomaran en cuenta las recomendaciones de la CONUEE sobre condiciones mecánicas y hábitos de conducción con respecto a las que se generan en exceso al evitar considerar dichas recomendaciones.

**Tabla 7.** Comparativo de emisiones esperadas y emisiones excesiva.

vehículos bajo condiciones mecánicas y hábitos de conducción equivalentes a los recomendados (cero litros de combustible adicionales y, por tanto, cero emisiones adicionales), mientras que hay otros conductores que reflejan casi el triple del

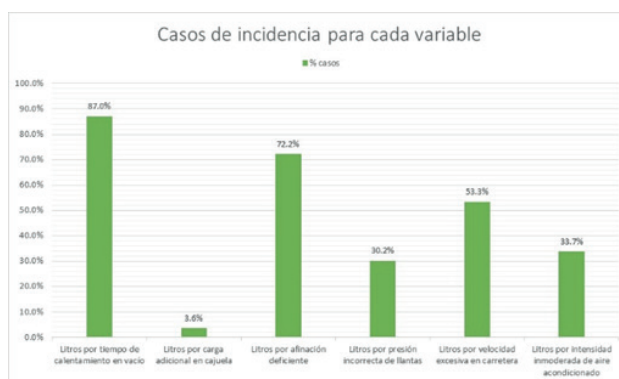
valor de emisiones de dióxido de carbono (máximo equivalente a 1320.89 kgCO<sub>2</sub>/ (vehículo\*año)) con respecto la media.

La incidencia para cada una de las variables con respecto al tamaño de la muestra

Variable	N	Nº casos	% casos
Litros por tiempo de calentamiento en vacío	169	147	87.0 %
Litros por carga adicional en cajuela	169	6	3.6 %
Litros por afinación deficiente	169	122	72.2 %
Litros por presión incorrecta de llantas	169	51	30.2 %
Litros por velocidad excesiva en carretera	169	90	53.3 %
Litros por intensidad inmoderada de aire acondicionado	169	57	33.7 %

**Nota.** Esta tabla menciona el número de casos de incidencia para cada variable y su respectivo porcentaje con relación al tamaño de la muestra (N).

**Tabla 8.** Resumen general de casos de incidencia para cada variable.



**Nota.** Este gráfico representa el porcentaje de casos de incidencia para cada variable conforme a lo indicado en la tabla 8.

**Figura 3.** Casos de incidencia para cada variable.

indica que dentro de los factores que contribuyen más frecuentemente a generar emisiones excesivas entre los usuarios es el tiempo de calentamiento en vacío y la afinación deficiente con 87 % y 72.2 % de los casos, respectivamente. En contraparte, el factor menos frecuente es la carga adicional en cajuela con solo 3.6 % (ver tabla 8 y figura 3). No obstante, es importante visualizar que no todos los cuestionarios respondidos representan consumo excesivo de combustible en todas las variables, es decir, los conductores no inciden en el 100 % de las variables. Por ejemplo, no se registró algún usuario que presentara consumo excesivo en todas las condiciones mecánicas y hábitos de conducción evaluados. Por otro lado, el 2.4 % de los ca-

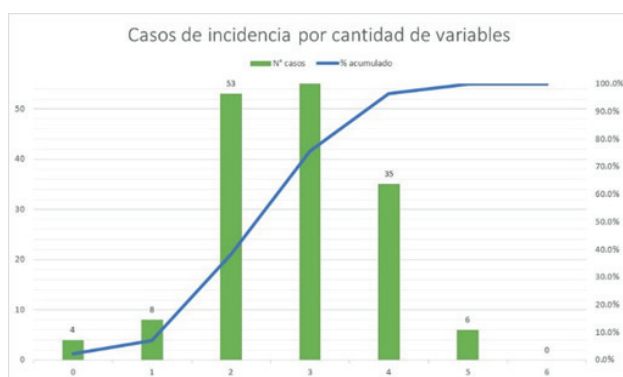
sos no muestran generación de emisiones en exceso conforme a las variables evaluadas en el proyecto. Las frecuencias más altas se reportan para incidencias desde dos hasta cuatro variables, sumando entre ellos 89.4 % del total de los casos evaluados (ver tabla 9 y figura 4).

Conforme a la tabla 7, en promedio, cada vehículo está consumiendo 1520.65 L de combustible al año (suma de las medias bajo condiciones recomendadas -1319.86 L- y los excesos bajo condiciones no recomendadas -200.79 L-), lo cual significa que, al aplicar hábitos de conducción y condiciones mecánicas, se puede reducir el consumo de combustible en un 13.2 % del total estimado.

Cantidad de variables	Nº casos	% casos	% acumulado
0	4	2.4 %	2.4 %
1	8	4.7 %	7.1 %
2	53	31.4 %	38.5 %
3	63	37.3 %	75.7 %
4	35	20.7 %	96.4 %
5	6	3.6 %	100.0 %
6	0	0.0 %	100.0 %
<b>Total</b>	<b>169</b>	<b>100.0 %</b>	<b>-</b>

**Nota.** Esta tabla menciona el número de casos de incidencia por cantidad de variables y sus respectivos porcentajes con relación al tamaño de la muestra (169).

**Tabla 9.** Resumen de casos de incidencia por cantidad de variables.



**Nota.** Este gráfico representa el número de casos de incidencia por cantidad de variables conforme a lo indicado en la tabla 9.

**Figura 4.** Casos de incidencia por cantidad de variables.

Por otro lado, al considerar como hábitos de conducción Litros por calentamiento en vacío, Litros por velocidad excesiva en carretera y Litros por intensidad inmoderada de aire acondicionado, el consumo en exceso de combustible derivado de la falta de aplicación de las recomendaciones observadas provocaría una media adicional de 116.12 L/(vehículo\*año), tal como se muestra en la tabla 10. En este sentido, cada vehículo está consumiendo 1435.98 L al año (suma de las medias bajo condiciones recomendadas -1319.86 L- y los excesos bajo condiciones no recomendadas en hábitos de conducción -116.12 L-) y ello se

traduce en que, al aplicar las recomendaciones de hábitos de conducción se podría reducir el consumo en un 8.09 %. Un estudio determinó una reducción del 15.82 % en el consumo de combustible en un vehículo (Chevrolet Aveo family a gasolina -el más vendido en el país de Ecuador-) al cambiar de una conducción normal a una conducción con ecodriving en una ruta en la ciudad de Quito, argumentando que existe una diferencia significativa en dicho consumo mediante su análisis de varianza (ANOVA) en el *software* STATGRAPHICS Centurion XVI (Leguísamo Milla, Llanes Cedeño, & Rocha Hoyos, 2020).



Variable	N	Litros/año	%
Litros por tiempo de calentamiento en vacío	169	1470.95	7.5 %
Litros por velocidad excesiva en carretera	169	10662.57	54.3 %
Litros por intensidad inmoderada de aire acondicionado	169	7490.11	38.2 %
<b>Total</b>	-	<b>19623.63</b>	<b>100.0 %</b>
<b>Promedio</b>	-	<b>116.12</b>	

**Nota.** Esta tabla menciona los litros de combustible por año consumidos por los vehículos analizados en las variables asociadas únicamente a los hábitos de conducción, y sus respectivos porcentajes con relación al total de la sumatoria de los resultados de dichas variables.

**Tabla 10.** Variables asociadas a los hábitos de conducción.

El ecodriving y las estrategias que puedan incrementar el rendimiento de combustible son atractivas para las personas. En promedio, personas de Colombia están dispuestas a pagar 1,020,000 pesos colombianos para mejorar 1 km/galón (equivalente a 264.2 m/L) el rendimiento de combustible (Morales Rodríguez, Ortiz Durán, & Márquez Díaz, 2016). En los resultados de la presente investigación se estima una mejora promedio del 13.2 % (1799 m/L considerando un rendimiento medio de la muestra de 11.83 km/L) por reducción mediante el control de hábitos de conducción y mantenimiento adecuado de condiciones mecánicas, lo que puede implicar incluso más beneficios sin la adquisición de un nuevo vehículo.

### Conclusiones

El conocimiento de las cantidades de contaminantes que se pueden evitar emitir a la atmósfera por excesos de consumo de combustible en los vehículos ligeros a partir de la aplicación de adecuados hábitos de conducción y mantenimiento de condiciones mecánicas permite la mejora en la conciencia ambiental de la población y la toma de decisiones asertivas para la minimización y/o mitigación del impacto medioambiental en este ámbito.

A partir del estudio realizado se definió que un vehículo puede generar un consumo promedio de combustible en exceso de 200.79 litros por cada 15,000 km, lo cual representa 468.17 kg de dióxido de carbono adicionales. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este valor podría variar de acuerdo con las características propias de cada vehículo.

La condición mecánica que presenta una mayor frecuencia es la afinación deficiente, con el 72.2 % de los casos y emisión de 168.2 kilogramos de dióxido de carbono por vehículo al año. Por otra parte, el hábito de conducción que representa un mayor porcentaje de incidencia es el tiempo de calentamiento en vacío (87 % de los casos) y emisión de 20.29 kilogramos de dióxido de carbono por vehículo al año.

La afinación deficiente representa la causa más frecuente en condiciones mecánicas para la generación de emisiones en exceso, mientras que el tiempo de calentamiento en vacío es la de mayor incidencia para los hábitos de conducción, con 72.2 % y 87 % de los casos, respectivamente. Sin embargo, las tres variables que representan el 89.42 % del total de las emisiones son la afinación deficiente, la velocidad excesiva en carretera (mayor a 90 km/h) y

la intensidad del aire acondicionado, con 35.9 %, 31.4 % y 22.1 %, respectivamente.

Será importante mejorar la difusión en la población en general sobre las distintas publicaciones y recomendaciones que las instituciones de mayor reconocimiento hacen acerca de las condiciones mecánicas y hábitos de conducción de mayor impacto en materia de uso de vehículos tanto ligeros como pesados.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco por las facilidades otorgadas para el desarrollo del proyecto de investigación y este artículo; asimismo, a Hugo Eduardo Gerón Cano y Josmar Hernández González por el valioso apoyo brindado en el seguimiento a dicho proyecto.

### Referencias

Barrera Doblado, Ó., y Ros Marín, J. A. *Vehículos eléctricos e híbridos*. Ediciones Paraninfo, 2017.

CONUEE. (17 de julio de 2015a). *Automovilista eficiente*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/automovilista-eficiente-movilidad-y-transporte?state=published> el 4 de diciembre de 2023.

CONUEE. (12 de marzo de 2015b). *Rendimiento de combustible en vehículos ligeros de venta en México*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/conuee/documentos/rendimiento-de-combustible-en-vehiculos-ligeros-de-venta-en-mexico> el 4 de diciembre de 2023.

Dammert Lira, A., & García C., R. *Economía de la energía*. Fondo Editorial de

la Pontificia Universidad Católica del Perú, 2020.

Elizondo Cordero, A., & Hernández Amezcua, T. Regulación de las emisiones de CO<sub>2</sub> para vehículos ligeros en México. *Gestión y Política Pública*, XXVII(2), 571-594. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11651/2654>, 2018.

Leguísamo Milla, J. C., Llanes Cedeño, E., & Rocha Hoyos, J. Impacto del Eco-driving sobre las emisiones y consumo de combustible en una ruta de Quito. *Enfoque UTE*, 11(1), 68-83. doi:<https://doi.org/10.29019/enfoque.v11n1.500>, 2020.

Leguísamo, J., Llanes Cedeño, E. A., Celi Ortega, S. F., & Rocha Hoyos, J. C. Evaluación de la conducción eficiente en un motor de encendido provocado, a 2810 msnm. *Información tecnológica*, 31(1), 227-236, doi:<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000100227>, 2020.

Morales Rodríguez, J. E., Ortiz Durán, D. J., & Márquez Díaz, L. G. Efecto del rendimiento del combustible en la decisión de compra de vehículo. *Facultad de Ingeniería*, 25(42), 55-66. doi:<http://dx.doi.org/10.19053/01211129.4629>. 2016.

Portal Eco-vehículos. (s.f.). *Portal de Indicadores de Eficiencia Energética y Emisiones Vehiculares*. Obtenido de Gobierno de México: <https://ecovehiculos.inecc.gob.mx/> el 22 de noviembre de 2022.

Sánchez Ruiz, M., & Solís Fraile, R. *Ámbito científico y matemático II*. Editex. 2020.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (28 de enero de 2021). *México trabaja en la reducción de CO<sub>2</sub> y*

*en fortalecer la adaptación al cambio climático.* Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/dia-mundial-por-la-reduccion-de-las-emisiones-de-carbono-co2?idiom=es> el 4 de diciembre de 2023.

Stanton, N., Landry, S., Di Bucchianico, G., & Vallicelli, A. *Advances in Human Aspects of Transportation*. Springer International Publishing Switzerland. 2017.



