

AZCATL

Revista de divulgación en ciencias, ingeniería e innovación

Año 3. Número 5. Julio-diciembre 2025, DOI: [10.24275/AZC20254A](https://doi.org/10.24275/AZC20254A)



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Dr. Gustavo Pacheco López
Rector general

Dra. Esthela Irene Sotelo Núñez
Secretaria general

UNIDAD AZCAPOTZALCO
Dra. Yadira Zavala Osorio
Rectora de Unidad

Mtro. Salvador Ulises Islas Barajas
Secretario de Unidad

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
Dr. Rafael Escarela Pérez
Director de División

Dra. Maricela Claudia Bravo Contreras
Secretaria académica

C.P. Rosa Ma. Benítez Mendoza
Jefa de la Oficina de Producción Editorial y Difusión de Eventos

**AZCATL. REVISTA DE DIVULGACIÓN EN CIENCIAS,
INGENIERÍA E INNOVACIÓN**

COMITÉ EDITORIAL
Dra. Grethell Georgina Pérez Sánchez
Presidenta

M. en C. Carlos Alejandro Vargas
Dr. César Augusto Real Ramírez
M. en C. Alejandro León Galicia
Dr. Aristeo Garrido Hernández

EQUIPO EDITORIAL
Mtro. Juan Manuel Galindo Medina
Diseño editorial y de cubierta

Lic. Liliana Ramírez Nuño
Corrección de estilo

D.A.A.D. María Fernanda Romero Gutiérrez
Diseño de la página web

Ilustración de primera y cuarta de forros:
Fidel Cruz Peregrino, creada con el software
de AI generativa Adobe Firefly.

Tabla de contenidos

Editorial	1
<i>La figura geométrica que sostiene al mundo: el triángulo</i>	3
Fidel Cruz Peregrino y Leonardo Di Girolamo Sigalotti Díaz	
<i>¿Y si una computadora pudiera entender los dichos mexicanos?</i>	7
Angeles Belém Priego Sánchez	
<i>Disolventes eutécticos profundos, una alternativa verde para la recuperación de metales de desechos electrónicos</i>	12
David Hernández Pérez, Nayeli Berenice Sánchez Piñón, Jorge Iván Aldana González y Manuel Eduardo Palomar Pardavé	
<i>¿Cómo se diseñan los edificios importantes para resistir sismos?</i>	17
José Alberto Rodríguez Morales, Jonathan De Anda Gil y Sonia E. Ruiz Gómez	
<i>Vidrios que amplifican la luz: explorando nuevos materiales para las telecomunicaciones</i>	21
Frida Lissete Flores Rivera	
<i>La contaminación atmosférica: un aumento en las zonas metropolitanas</i>	26
Mariana Guevara Martínez, Jailene Marlen Jaramillo Pérez y Bárbara Azucena Macías Hernández	
<i>Rizorremediación: cuando plantas y microorganismos se convierten en aliados en la recuperación del ambiente</i>	33
Sofía Vite Velázquez, Alejandro Islas García, Ricardo Solís Olivier y Vanessa Flores Mercado	
<i>Microplásticos en el aire y el mar: evidencia desde los puertos de México</i>	39
Salvador Reynoso Cruces	

AZCATL. Año 3, Número 5, Julio-diciembre de 2025, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma Metropolitana a través de la Unidad Azcapotzalco, División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Prolongación Canal de Miramontes 3855, col. Ex-Hacienda San Juan de Dios, alcaldía Tlalpan, C.P. 14387, Ciudad de México, México; tel. 55 5318 9528, página electrónica de la revista <https://azcatl.auc.uam.mx/> y dirección electrónica: geps@azc.uam.mx. Editor responsable: Dra. Grethell Georgina Pérez Sánchez. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo de Título núm. 04-2023-050317153000-102, ISSN: 3061-7510, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Dra. Grethell Georgina Pérez Sánchez, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Unidad Azcapotzalco, edificio P, primer piso, av. San Pablo 420, col. Nueva El Rosario, alcaldía Azcapotzalco, C.P. 02128, Ciudad de México, México; Fecha de última modificación: 2 de diciembre de 2025. Tamaño del archivo 11.8 MB.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Editorial

En la quinta edición de la revista *Azcatl* reunimos una serie de miradas científicas que revelan cómo el conocimiento actual transforma nuestra comprensión del mundo. Desde estrategias naturales para limpiar ambientes contaminados hasta materiales avanzados que potenciarán las telecomunicaciones del futuro, transcurriendo por fenómenos urbanos, expresiones lingüísticas y desafíos sísmicos. Cada artículo invita a explorar la ciencia que está presente en nuestra vida cotidiana, donde el objetivo es acercarte al conocimiento de forma accesible, diversa y estimulante, mostrando cómo distintos campos de la ciencia, la tecnología y la ingeniería convergen para explicar y mejorar el entorno en que vivimos.

«El triángulo: la figura geométrica que sostiene al mundo» es el artículo con el que inicia este número, el cual muestra que aunque las matemáticas parezcan ajena a la vida diaria, sus formas están por todas partes. El triángulo, en particular, aparece constantemente en obras arquitectónicas, piezas artísticas, tecnologías modernas y estructuras naturales. Este trabajo reflexiona sobre su presencia silenciosa pero predominante y acerca de cómo esta figura elemental ha contribuido al desarrollo de la civilización.

Las expresiones populares como «colgar los tenis» o «dejar con el ojo cuadrado» no pueden interpretarse palabra por palabra, pues su significado surge del uso cultural. Estos giros son parte esencial del español mexicano, pero representan un reto para los sistemas automáticos de procesamiento del lenguaje. Así surge la pregunta de nuestro segundo artículo: ¿puede una computadora entender los dichos mexicanos?. En este trabajo se analiza cómo entrenar modelos computacionales capaces de identificar estas locuciones verbales en textos digitales, con la intención de lograr que las máquinas comprendan mejor nuestra forma cotidiana de hablar.

El alto consumo de tecnología en el mundo ha incrementado la cantidad de desechos electrónicos y, con ello, la preocupación por su manejo. En este tercer artículo, los autores describen el uso de disolventes eutéticos profundos (DES) como método para extraer metales valiosos presentes en los residuos electrónicos. Los DES representan una alternativa ambiental favorable que ha mostrado resultados prometedores en el aprovechamiento de materiales que de no ser reutilizados terminarían contaminando.

Cuando ocurre un sismo fuerte, algunas construcciones deben permanecer en operación para atender emergencias, como son los hospitales, estaciones de bomberos, escuelas-refugio o centros de transporte. Es por ello que su diseño requiere de normas más rigurosas que las aplicadas a edificaciones convencionales. «¿Cómo se diseñan los edificios esenciales para resistir terremotos?» es un trabajo que explica los criterios y técnicas que emplean los ingenieros estructurales para que estas construcciones continúen funcionando aun expuestas a fuertes movimientos telúricos.

En el quinto artículo de este número, la autora explica cómo el desarrollo de nuevos vidrios ópticos busca mejorar la capacidad para transmitir y amplificar luz, lo cual es fundamental para el desarrollo de sistemas de comunicaciones y de dispositivos como láseres y sensores. Además, nos expone cómo al incorporar elementos de tierras raras, estos materiales adquieren propiedades que permiten conexiones más rápidas y eficientes para una sociedad cada vez más interconectada.

En muchas ciudades, la calidad del aire se ha deteriorado debido al incremento industrial, al uso intensivo de vehículos y a la quema de biomasa y otros combustibles. Todo esto afecta la salud humana y agrava problemas ambientales como el calentamiento global. En el trabajo «La contaminación atmosférica: un aumento en las zonas metropolitanas» se subraya la necesidad de políticas integrales que incluyan control, prevención y reducción de emisiones, así como su enlace con las estrategias de mitigación del cambio climático.

«Rizorremediación: cuando las plantas y los microbios colaboran para sanear el ambiente» es un artículo donde se explica el riesgo por la exposición a múltiples componentes del entorno natural debido al aumento de la contaminación derivada del desarrollo humano. Para enfrentar esta amenaza, la ciencia investiga alternativas sostenibles como la rizorremediación, proceso en el que las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo actúan en conjunto para transformar o degradar sustancias nocivas. Este texto presenta los principios que hacen posible esta estrategia y expone ejemplos donde ha demostrado ser una herramienta eficaz para la recuperación ambiental.

El octavo artículo explica como los microplásticos se han vuelto un contaminante persistente tanto en ambientes marinos como en el aire. Los autores muestran evidencias de investigaciones en los puertos de Veracruz y Manzanillo, en donde se identificaron varios tipos de polímeros en el agua y el aire, como el poliéster, polietileno y acrílico. Asimismo, exponen que las brisas marinas pueden transportar estas partículas desde el océano hacia la atmósfera, lo que favorece su dispersión. Los resultados de su trabajo resaltan la urgencia de implementar acciones para frenar su propagación.

La figura geométrica que sostiene al mundo: el triángulo

Fidel Cruz Peregrino

Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Azcapotzalco

fcruz@azc.uam.mx

Leonardo Di Girolamo Sigalotti Díaz

Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Azcapotzalco

leonardo.sigalotti@gmail.com

Resumen

La geometría y, menos aún, las matemáticas son de los conceptos que generalmente no consideramos en nuestro día a día, sin embargo, están presentes cotidianamente, siendo parte fundamental de la civilización moderna. En particular, los triángulos, que discretamente aparecen en construcciones, en el arte y el diseño, en la ciencia y la tecnología, en la naturaleza y, en algunos casos, como parte de nuestro sentido de integración con el universo.

Palabras clave

Triángulo, geometría y geometría aplicada.

Abstract

Geometry, and much less mathematics, are concepts we generally don't consider in our daily lives; however, they are present every day, forming a fundamental part of modern civilization. Triangles, in particular, discreetly appear in constructions, in art and design, in science and technology, in nature, and in some cases as part of our sense of integration with the universe.

Keywords

Triangle, geometry, applied geometry.

APA: Cruz, F. y Sigalotti, L. (2025). La figura geométrica que sostiene al mundo: el triángulo. *Azcatl*, 5, 3-6. DOI: [10.24275/AZ-2025B007](https://doi.org/10.24275/AZ-2025B007)

Introducción

Si observas a tu alrededor encontrarás una repisa o un tripié, posiblemente sosteniendo algo. Estas dos estructuras están formadas por una de las figuras geométricas más sencillas que podemos dibujar, formada de tres líneas rectas y tres vértices, llamadas triángulos. Dichos triángulos no sólo están en los libros de matemáticas o geometría, también están en puentes, edificios, techos de casas, centros comerciales, señales de tránsito, parada del camión, obras de arte, en las imágenes de tu computadora, en la geolocalización que usa tu celular y en la naturaleza misma, por mencionar unos ejemplos. Conocer su importancia nos ayuda a entender como la geometría está presente en nuestra vida. En este artículo vamos a explorar algunos logros de esta forma sencilla que va de lo abstracto a la arquitectura, la ingeniería, arte, los cálculos computacionales, así como a la navegación terrestre y estelar, a la naturaleza misma y a la búsqueda de nuestra relación con el universo.

El triángulo: una figura fundamental

Esta forma es intrínsecamente estable, en comparación con un rectángulo u otras figuras, ya que al aplicar fuerza en uno de sus vértices ésta se distribuye de forma eficiente a lo largo de sus lados, sin causar deformaciones, lo que en ingeniería se llama rigidez estructural (Hibbeler, 2016). Esto no sucede si se aplica fuerza en alguno de los lados de un cuadrado o rectángulo, haciendo que dicho lado se deforme, llamado fallo por pandeo (Hibbeler, 2016). Gracias a esta particular características del triángulo, ha sido posible construir algunas de las grandes estructuras de la ingeniería. Su forma tan sencilla es fundamental en la navegación moderna y en cálculos computacionales, en la visualización de superficies, entre otras aplicaciones. Un concepto fundamental de las matemáticas y la geometría, es el teorema de Pitágoras, que se basa en la relación que existe entre los lados del triángulo y su hipotenusa; recuerda que dichas relaciones son el origen de las funciones seno y coseno, de suma importancia en la ciencia y tecnología. Los triángulos también aparecen en tres de los cinco sólidos platónicos; éstos son poliedros regulares cuyas caras son polígonos regu-

lares idénticos, en particular hay tres, cuyas caras están formadas por triángulos equiláteros: el tetraedro, el octaedro y el icosaedro.

Los triángulos en la arquitectura y la ingeniería

Seguramente has observado en algunos edificios una rara estructura compuesta de triángulos que ayuda a distribuir el peso de forma uniforme, dicha estructura es conocida como estructura de celosía (Salvadori y Heller, 1986). Esta estructura es común en techos, puentes, torres eléctricas y de telecomunicaciones y grandes edificios (ver Figura 1). Gracias a esos triángulos, estas estructuras compuestas de varios cientos o miles de triángulos son estables, resistentes y sobre todo ligeras. Un ejemplo icónico es la famosísima Torre Eiffel (ver Figura 2), que está compuesta de miles de piezas metálicas formando triángulos, dicha forma, además de ayudar a darle su forma icónica, también le permite tener una estructura estable que puede soportar fuertes vientos. Otro uso de estas estructuras es en la construcción de puentes, tanto de acero o madera, lo que ayuda a distribuir de manera uniforme el peso de los vehículos y peatones. Otro ejemplo del uso cotidiano de los triángulos son los cuadros de la bicicleta, que en general están formados por triángulos, lo que permite que ésta sea ligera y resistente.



Figura 1. Ejemplo de una estructura de celosía.

Fuente: elaboración propia por medio del software de AI generativa Adobe Firefly.



Figura 2. La Torre Eiffel, mostrando la estructura de triángulos que le da estabilidad y resistencia.

Fuente: elaboración propia por medio del software de AI generativa Adobe Firefly.

Triángulos en la naturaleza y la ciencia

Si observamos con detenimiento, es posible encontrar triángulos en diferentes patrones naturales, por ejemplo, los copos de nieve presentan patrones basados en triángulos, así como en las colmenas de las abejas, que están formadas de hexágonos que se pueden descomponer en triángulos, lo que da rigidez al panal. Patrones más evidentes son las montañas, que adquieren su peculiar forma debido a la atracción gravitacional y, en parte, a la erosión del viento y el agua. A nivel molecular también se encuentran patrones triangulares, por ejemplo, la molécula del agua con una estructura que recuerda un triángulo.

En la ciencia, por medio de un sencillo experimento con luz y sombras, usando la geometría de triángulos semejantes, Eratóstenes, hace más de dos mil años, logró determinar que la Tierra es esférica y sus dimensiones (Sagan, 1980). Asimismo, utilizando el triángulo que tiene como base la distancia entre el Sol y la Tierra, los astrónomos pueden determinar la distancia a varios millones de objetos celestes y junto con otras observaciones se puede saber cómo se mueve el Sol y el conjunto de estrellas a su alrededor.

Otra de las aplicaciones de los triángulos también la podemos observar, literalmente, en imágenes digitales 3D, ya que las superficies se representan por medio de

una red de triángulos diminutos (ver Figura 3) que podemos caracterizar matemáticamente y con esos datos representar ese mundo digital. Dichas aplicaciones las vemos en videojuegos, animaciones y simulaciones científicas (Hughes, et al. 2014).

Triángulos en el arte y el diseño

Los triángulos juegan un papel muy importante en las obras de arte y el diseño. En muchas de las obras renacentistas los artistas utilizaron los triángulos para generar los puntos de fuga, así como para guiar la mirada del espectador y buscar un equilibrio visual. Un ejemplo muy conocido del uso de los triángulos en el arte es *La última cena* de Leonardo da Vinci, en donde la figura de Jesús se encuentra al centro con sus brazos extendidos formando un triángulo apuntando hacia arriba y la disposición de los apóstoles separándose de él con triángulos apuntando hacia abajo, lo que fundamenta la jerarquía del personaje (Kemp, 2006). El uso de los triángulos en el diseño gráfico aparece, particularmente, en la publicidad. La imagen de un triángulo que apunta hacia arriba nos da la impresión de crecimiento, dinamismo, progreso y fuerza. Caso contrario, si apunta hacia abajo se interpretan como inestabilidad, tensión o decrecimiento. Los diseñadores conocen estos recursos para transmitir visualmente estos conceptos.



Figura 3. Ejemplo de cómo una superficie puede ser ajustada y digitalizada por una red de triángulos.

Fuente: elaboración propia por medio del software de AI generativa Adobe Firefly.

Triángulo como símbolo

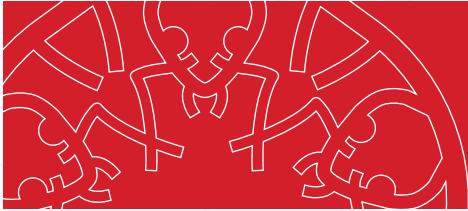
Aunque hemos mencionado algunas de las funciones prácticas del triángulo, éste también ha sido utilizado a través de la historia para representar la unidad entre tres elementos como cuerpo, mente y espíritu; pasado, presente y futuro; y tierra, mar y cielo. Una representación muy conocida en el mundo occidental es la santa trinidad. Por otro lado, en algunas culturas un triángulo apuntando hacia arriba da un sentido de ascenso, equilibrio, movimiento, símbolo de masculinidad, el fuego y el cielo. Cuando apunta hacia abajo es un símbolo de feminidad asociado a la fertilidad, el agua y la tierra (Cirlot, 1997).

Conclusión

Aunque a veces no estamos conscientes de su presencia, el triángulo está en todas partes, tanto en los objetos de uso común, sosteniendo edificios y puentes y en las imágenes computacionales. Es una figura sencilla, esencial y poderosa. Hemos mencionado unos pocos ejemplos para comprender su presencia en la geometría del mundo, como algo que da estabilidad y belleza. El triángulo no sólo sirve para apoyar y sostener estructuras, también ayuda a entender el universo que nos rodea y a vincular nuestra existencia en el mismo.

Referencias

- Cirlot, J. E. (1997). *Diccionario de símbolos*. Siruela.
- Hibbeler, R. C. (2016). *Engineering mechanics: statics* (14.^a ed.). Pearson.
- Hughes, J. F., Van Dam, A., McGuire, M., Sklar, D. F., Foley, J. D., Feiner, S. K., y Akeley, K. (2014). *Computer graphics: principles and practice* (3.^a ed.). Addison-Wesley Professional.
- Kemp, M. (2006). *Leonardo da Vinci: las maravillosas obras de la naturaleza y el hombre*. Ediciones Akal.
- Sagan, C. (1980). *Cosmos*. Planeta.
- Salvadori, M. y Heller, R. (1986). *Structure in architecture: the building of building*. Prentice Hall.



¿Y si una computadora pudiera entender los dichos mexicanos?

Angeles Belém Priego Sánchez

Universidad Autónoma Metropolitana,

Unidad Azcapotzalco

abps@azc.uam.mx

Resumen

¿Qué tienen en común expresiones como «colgar los tenis» o «dejar con el ojo cuadrado»? Ambas son locuciones verbales, es decir, combinaciones de palabras con un verbo, cuyo significado no se puede deducir literalmente al analizar cada término por separado. Estas expresiones son parte del español mexicano y reflejan aspectos culturales, sociales y emocionales que a menudo se apartan de las reglas gramaticales tradicionales; pero ¿qué pasa cuando intentamos detectar estas expresiones automáticamente en textos digitales? En este artículo exploramos cómo enseñar a las computadoras a reconocerlas, con el objetivo de que comprendan mejor cómo hablamos en la vida cotidiana.

Palabras clave

Frases mexicanas, sentido figurado, aprendizaje automático e inteligencia artificial.

Abstract

What do expressions like «colgar los tenis» (kick the bucket) or «dejar con el ojo cuadrado» (knock someone's socks off) have in common? Both are verbal idioms, meaning combinations of words that include a verb, whose meaning can't be literally deduced by analyzing each term separately. These expressions are part of Mexican Spanish and reflect cultural, social, and emotional aspects that often deviate from traditional grammatical rules. But what happens when we try to detect these expressions automatically in digital texts? In this article, we explore how to teach computers to recognize them, with the goal of helping machines better understand how we speak in everyday life.

Keywords

Mexican expressions, figurative meaning, machine learning, artificial intelligent.

APA: Priego, A. (2025). ¿Y si una computadora pudiera entender los dichos mexicanos? *Azcatl*, 5, 7-11. DOI: [10.24275/AZC2025B002](https://doi.org/10.24275/AZC2025B002)

De qué trata este estudio

La capacidad para comunicarnos se construye gracias a toda la información que vamos aprendiendo y guardando en la memoria a lo largo de la vida. Esa información se organiza en frases, expresiones y dichos que usamos para expresar ideas o conceptos. Estudiar estas frases y expresiones es el objetivo de la fraseología, una rama que se enfoca en entender cómo funcionan estos grupos de palabras. Esto es diferente a la lingüística tradicional, que abarca varias áreas como la estructura de las palabras, la sintaxis, el significado, el uso social del lenguaje y cómo pensamos al hablar.

En el mundo de la lingüística hay muchas formas de nombrar a las expresiones hechas que usamos en el día a día: modismos, locuciones, frases hechas, dichos, refranes, entre otras; se han registrado hasta 64 términos distintos para referirse a este tipo de combinaciones de palabras. En este trabajo se opta por llamarlas unidades fraseológicas, un término ampliamente aceptado por los especialistas tanto en el ámbito hispano como internacional (Priego, 2020).

El presente estudio se enfoca en un tipo muy particular de estas unidades: las locuciones verbales dentro del español que se habla en México. Expresiones como «colgar los tenis» (morir) o «zafarse un tornillo» (perder la razón) dicen mucho más de lo que aparentan y su sentido no se puede deducir simplemente leyendo palabra por palabra. Estas frases son parte del lenguaje local y representan un reto tanto para quienes aprenden español como para las máquinas que intentan entenderlo.

Las locuciones verbales son un tipo particular de unidad fraseológica, combinaciones de dos o más palabras que funcionan como una unidad dentro de una oración; lo interesante es que su significado no puede entenderse simplemente sumando lo que significa cada palabra por separado. En el caso de las locuciones verbales, éstas incluyen un verbo como núcleo y su sentido no es literal. Por ejemplo, «colgar los tenis» no implica realmente que alguien haya puesto calzado en un gancho, sino que significa morir. Este tipo de expresiones tienen tres propiedades fundamentales: cuentan con más de una palabra,

se recuerdan como un todo, como una sola *palabra mental* y su significado no puede deducirse por partes. Detectarlas no es sencillo, ya que se puede decir de varias formas una idea con diferentes frases.

Las locuciones verbales son una parte rica y compleja del lenguaje, llenas de matices culturales y lingüísticos. Uno de los grandes aportes del estudio es demostrar que, aunque entender estas locuciones parece intuitivo para hablantes nativos, enseñarle a una computadora a entender el lenguaje humano y reconocerlas es un reto interesante que requiere métodos de inteligencia artificial.

Lo que le enseñamos a las computadoras

La tecnología ha evolucionado tanto que ahora podemos pedirle a una máquina que entienda frases o dichos como si fuera una persona. En el caso del español mexicano, se han empezado a desarrollar herramientas que permitan identificar locuciones verbales en diversos tipos de textos. Cabe aclarar que cuando hablamos de locuciones verbales mexicanas, nos referimos a expresiones que se usan y entienden comúnmente en México, aunque eso no significa que no puedan aparecer en otros países de habla hispana.

Para lograr este objetivo, la comunidad de investigadores ha creado recursos lingüísticos especialmente diseñados para entrenar los sistemas de inteligencia artificial. ¿Cómo funciona esto?, a través de una técnica llamada aprendizaje automático supervisado, un área de la inteligencia artificial que capacita las máquinas para adquirir conocimientos a partir de ejemplos previamente revisados y etiquetados por personas expertas; por lo que, la detección automática se basó en este tipo de técnicas, es decir, utilizando tecnologías que aprenden observando casos concretos, así como nosotros lo hacemos: aprendiendo con ejemplos y correcciones. Supongamos que se desea que la computadora entienda la frase «andar de pata de perro», entonces primero se le *enseña* a partir de ejemplos de uso de la frase, tanto literales como figurativos; una vez que ha *aprendido* cómo se utiliza la frase, posteriormente puede emplearla en otros ejemplos y contextos diferentes.

Teniendo esto en mente, lo primero que se necesita es construir un conjunto de datos, también llamado un corpus etiquetado, con textos —algunos con locuciones verbales y otros que no— que tengan muchos ejemplos de utilización con las diversas frases mexicanas. Con motivo de ser ilustrativo, en este artículo vamos a usar un corpus supervisado en el dominio noticiero. Estos textos fueron extraídos de periódicos mexicanos que forman parte de la Organización Editorial Mexicana (oEM), cada uno fue revisado y anotado manualmente para señalar si contenía o no alguna locución verbal para entrenar modelos con los datos que le permitieran a la computadora utilizar dichas locuciones después, de manera automática y por sí sola.

Para saber qué expresiones buscar se utilizó como fuente principal el Diccionario de Mexicanismos, una obra impresa que recoge palabras y frases propias del español de México. Este diccionario es especialmente útil porque no sólo incluye términos actuales y tradicionales, sino que también compara el uso mexicano del español con el de otros países, en especial con el de España. Además, es un diccionario descriptivo: no impone reglas, sino que refleja cómo se habla realmente el español de México, incluyendo también palabras nuevas y extranjerismos que forman parte del habla cotidiana.

Con todos estos recursos —textos anotados, un diccionario especializado y técnicas de aprendizaje automático—, el objetivo es que las computadoras aprendan a identificar y entender automáticamente cuándo un texto contiene una locución verbal mexicana, ayudando así a entender mejor el lenguaje cotidiano tal como realmente se usa.

Utilizando técnicas de recuperación de información (algo así como un buscador inteligente), se identificaron 3 164 textos periodísticos provenientes de la OEM. Cada uno de estos textos contiene al menos una aparición de alguna de las locuciones verbales seleccionadas, ya sea en su forma original o en una versión ligeramente modificada. Por ejemplo, la locución «darse por vencido» puede encontrarse en otras formas como «darse por vencida», «darnos por vencidos» o «darse por vencidas». Para de-

tectar todas estas variantes, tanto las locuciones como los textos fueron procesados con una técnica llamada lematización, que reduce las palabras a su forma base. Finalmente, se usó un método llamado validación cruzada (en este caso con 10 particiones o *pliegues*) para entrenar y probar el modelo de forma equilibrada y así asegurar que el sistema no sólo reconociera las locuciones que ya había visto, sino que también pudiera identificar otras similares en nuevos textos. La Figura 1 resume las diferentes etapas, descritas anteriormente, empleadas para que una computadora aprenda a entender locuciones verbales mexicanas.



Figura 1. Cómo una computadora aprende a entender locuciones verbales mexicanas.

¿Qué se ha obtenido?

Tras enseñar a las computadoras con varios programas, las cuales aprenden del lenguaje con ejemplos reales, comprobamos si podían detectar locuciones verbales mexicanas. Entonces ¿puede una máquina entender expresiones como «meter la pata»? Aunque parezca increíble, sí; gracias a técnicas de inteligencia artificial, las

computadoras pueden aprender a reconocerlas. Para lograrlo, se entrenaron las máquinas con alrededor de 3 000 frases tomadas del uso cotidiano del español mexicano extraídas de noticias, marcadas previamente por personas expertas. Seguidamente, se pusieron a prueba cuatro algoritmos distintos —árboles de decisión, J48; vectores de soporte, SMO; modelo probabilístico, Naïve Bayes; y vecinos cercanos, K-Star— para ver cuál entendía mejor cuándo una expresión era una locución verbal (Priego y Pinto, 2023).

De los cuatro algoritmos, el más *inteligente* resultó ser J48, una técnica que aprende a tomar decisiones siguiendo patrones en el lenguaje. En el caso específico de este corpus, el modelo logró identificar correctamente estas expresiones con resultados que son cercanos al 77 % de precisión (exactamente 76.74 %), es decir, de cada 10 casos reales del lenguaje con dichos mexicanos la máquina entiende 7, en uno tiene duda y en dos se equivoca. El éxito de los árboles de decisión se debe a que entienden las palabras y el orden en que aparecen, algo clave en este tipo de expresiones idiomáticas.

Este estudio es importante porque estas frases no son sólo adornos del lenguaje, son parte de nuestra cultura, nuestra forma de hablar y de sentir. Si queremos que la tecnología nos entienda realmente —como hablamos en la calle, en las noticias o en redes sociales— necesitamos que también comprenda nuestras expresiones más auténticas. Además, detectar automáticamente estas expresiones es una tarea compleja incluso para humanos, porque muchas veces su significado no se entiende literalmente, así que el hecho de que una máquina pueda hacerlo con una precisión aceptable es un avance enorme.

Los beneficios se observan en tareas como la traducción automática, al permitir encontrar equivalencias idiomáticas más precisas en otros idiomas; el análisis de sentimientos, al facilitar la detección de emociones implícitas en expresiones coloquiales; y en la extracción de información y la generación de resúmenes automáticos, al ayudar a captar mejor el sentido global de un texto. Por otra parte, se mejora la comprensión semántica y sintáctica al tratar estas unidades como bloques coherentes y

resulta especialmente útil en sistemas de diálogo, donde permite interpretar y generar respuestas más naturales y contextualmente apropiadas.

Los resultados son alentadores y se espera que, con el apoyo de enfoques lingüísticos más profundos, el rendimiento mejore en futuras investigaciones. Éste es sólo el primer paso. El siguiente reto es ampliar esta investigación a otros tipos de textos, otros acentos, otras regiones y, por supuesto, a las lenguas originarias de México, para que la tecnología también hable nuestra diversidad.

Lo que nos deja esta investigación

Durante los últimos tiempos, el interés por el estudio de las frases o dichos —también conocidos como unidades fraseológicas— ha crecido dentro del campo de la lingüística aplicada y computacional. Esta rama, llamada fraseología, es clave para entender cómo usamos el lenguaje en la vida real y tiene aplicaciones prácticas muy importantes, por ejemplo, en traducción automática, en análisis de opiniones o sentimientos en redes sociales, en procesamiento de lenguaje natural y en educación lingüística, por citar algunos.

Las frases son palabras que hacen equipo para expresar una idea que, aunque puede admitir algunas variaciones, no funciona si la frase se separa o se interpreta palabra por palabra. Un ejemplo claro es la expresión «tirar la toalla», que no significa literalmente lanzar una toalla, sino rendirse. Este tipo de expresiones refleja no sólo la estructura del idioma, sino también aspectos culturales y sociales.

En este trabajo, el foco estuvo en un tipo específico de estas unidades: las locuciones verbales mexicanas, es decir, frases comunes del español de México que giran en torno a un verbo. El objetivo fue analizar estas expresiones y, sobre todo, explorar cómo una computadora puede aprender a identificarlas en textos escritos. Asimismo, permitió demostrar que el español mexicano, con toda su riqueza y variabilidad, puede ser analizado con herramientas computacionales avanzadas.

La investigación destaca la importancia de las locuciones verbales como parte vital de nuestra lengua y

muestra cómo la inteligencia artificial puede acercarse —aunque con limitaciones— al modo en que los humanos entendemos expresiones idiomáticas. Éste es sólo el comienzo, pero ya estamos enseñando a las máquinas a entender cómo hablamos realmente en México. El próximo reto es extender este estudio a otros géneros textuales, a otras lenguas e incluso a las lenguas originarias de México, para que la tecnología refleje la riqueza y diversidad lingüística del país.

Referencias

- Alves, D., Fischer, S. y Teich, E. (2025). Syntagmatic productivity of MWEs in scientific english, proceedings of the 21st workshop on multiword expressions. *Association for Computational Linguistics*, pp. 1-6, doi: [10.18653/v1/2025.mwe-1.1](https://doi.org/10.18653/v1/2025.mwe-1.1)
- Baldwin, T., Bannard, C., Tanaka, T. y Widdows, D. (2003). *An empirical model of multiword expression decomposability* (pp. 89-96). Association for Computational Linguistics.
- Casares, J. (1992). *Introducción a la lexicología moderna*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Fakharian, S. y Cook, P. (2021). *Contextualized embeddings encode monolingual and cross-lingual knowledge of idiomaticity*. (pp. 23-32). Association for Computational Linguistics.
- González, M. I. y Ortega, G. D. (2005). En torno a la variación de las unidades fraseológicas. En R. Almeida, Ramón, E. y Wotjak, G. *Fraseología contrastiva: con ejemplos del alemán, español, francés e italiano*. Universidad de Murcia.
- Gramley, S., Gramley, V. y Patzold, K. M. (1992). *A survey of modern english*. Routledge.
- Lamiroy, B. (2005). *Le problème central du figement est le semi-figement*. Linx.
- Manning, C.D., Raghavan, P. y Schutze, H. (2008). *Introduction to information retrieval*. Cambridge University Press.
- Pinto, D. y Priego, B. (2020). Using automatic constructed thesauri instead of dictionaries in the verbal phraseological units validation task. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 39(2), pp. 2061-2070. <https://doi.org/10.3233/JIFS-179>.
- Priego, B. (2020). A new lexical resource for evaluating polarity in spanish verbal phrases. *Computación y Sistemas*, 24(2), pp. 725-732. doi: [10.13053/CyS-24-2-3409](https://doi.org/10.13053/CyS-24-2-3409)
- Priego, B. y Pinto, D. (2023). *Locuciones verbales del español mexicano: un análisis desde la lingüística computacional*. Libros BUAP.
- Ramisch, C., Walsh, A., Blanchard, T. y Taslimipoor, S. (2023). *A survey of MWE identification experiments: the devil is in the details* (pp. 106-120). Association for Computational Linguistics. doi: [10.18653/v1/2023.mwe-1.15](https://doi.org/10.18653/v1/2023.mwe-1.15)
- Sag, I. A., Baldwin, T., Bond, F., Copestate, A. y Flickinger, D. (2002). Multiword expressions: a pain in the neck for NLP. En A. Gelbukh (Ed.). *Computational linguistics and intelligent text processing. CICLing 2002. Lecture notes in computer science. Volumen 2276*. Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-45715-1_1
- Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236), 433-460. doi:[10.1093/mind/LIX.236.433](https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433)
- Zuloaga, A. (1980). *Introducción al estudio de las expresiones fijas*. Verlag Peter Lang.

Disolventes eutécticos profundos, una alternativa verde para la recuperación de metales de desechos electrónicos

David Hernández Pérez

Universidad Autónoma Metropolitana,

Unidad Azcapotzalco

dahepe@azc.uam.mx

Jorge Iván Aldana González

Universidad Autónoma Metropolitana,

Unidad Azcapotzalco

jiag@azc.uam.mx

Nayeli Berenice Sánchez Piñón

Universidad Autónoma Metropolitana,

Unidad Azcapotzalco

nbsp@azc.uam.mx

Manuel Eduardo Palomar Pardavé

Universidad Autónoma Metropolitana,

Unidad Azcapotzalco

mepp@azc.uam.mx

Resumen

El incremento desmedido de desechos electrónicos, generado por el uso cotidiano de la tecnología, ha dado como resultado una acumulación de éstos y con ello una preocupación generalizada sobre el tratamiento y manejo de dichos residuos. En el presente trabajo se aborda la implementación de los disolventes eutécticos profundos (DES) para la recuperación de metales de alto valor a partir de los residuos electrónicos, una excelente alternativa, amigable con el medio ambiente, que ha presentado resultados prometedores.

Palabras clave

Recuperación, metales y disolventes verdes.

Abstract

The excessive increase in e-waste generated by everyday use has resulted in an accumulation and, consequently, widespread concern about its treatment and management. This paper addresses the implementation of deep eutectic solvents (DES) for the recovery of high-value metals from e-waste as an excellent, environmentally friendly alternative that has yielded promising results.

Keywords

Recovery, metals, green solvents.

APA: Hernández, D., Aldana, J. , Sánchez, N. y Palomar, M. (2025). Disolventes eutécticos profundos, una alternativa verde para la recuperación de metales de desechos electrónicos. *Azcatl*, 5, 12-16. DOI: [10.24275/AZC2025B003](https://doi.org/10.24275/AZC2025B003)

Introducción

Los desechos electrónicos, también llamados *e-waste*, son dispositivos que llegaron al final de su vida útil, es decir, tecnología que dejó de ser funcional o de utilidad, ya sea por el desgaste generado por el tiempo de uso, por el avance tecnológico o por la conocida obsolescencia programada, la cual es planeada por estrategias de mercado (Dutta *et al.*, 2023). Sabemos que los electrodomésticos comprenden gran parte de los dispositivos utilizados de manera cotidiana en el hogar, lo que conlleva un crecimiento constante del número de residuos generado por las grandes urbes.

La importancia de estos dispositivos se centra en su contenido de elementos metálicos de valor agregado, como son metales preciosos (Au, Ag, Pt, Pd), tierras raras (Li, La, Nd, Dy) y metales de transición (Co, Ni, Mn, Zn) (Zheng *et al.*, 2024). La metodología tradicional para recuperar metales a partir de desechos electrónicos usando medios acuosos, como ácidos o mezclas de ácidos en altas concentraciones, tiene porcentajes altos de efectividad, cercanos al 100 %, sin embargo, presenta ciertas desventajas, destacando la corrosividad elevada y los elevados costos de operación, así como altos consumos energéticos. El manejo inadecuado de esta metodología puede causar daños a los ecosistemas del medio ambiente (Shahabuddin *et al.*, 2023). Es por ello que la aparición de alternativas verdes como la fitominería, biolixiviación, biometalurgia, microminería, biosorción, entre otras, han sido de gran interés para la recuperación de metales, no obstante, también presentan algunas desventajas importantes: su cinética de reacción es lenta, tienen baja selectividad y conllevan el uso de altas cantidades de agua, lo cual limita su aplicación.

Disolventes eutécticos profundos (DES)

Son un tipo de líquidos iónicos que surgieron a partir del año 2004; dentro de sus características principales destaca que sus puntos de fusión son bastante bajos en comparación con sus componentes de manera individual, llegando a ser completamente líquidos a temperatura ambiente. Además, son biodegradables, presentan alta selectividad, son capaces de formar complejos, pre-

sentan alta estabilidad térmica y química, son de fácil preparación, presentan ventanas de potencial más amplias que otros disolventes, son baratos y la generación de subproductos tóxicos es baja en comparación con otros medios empleados (Aldana *et al.*, 2024; Smith *et al.*, 2014). Todas las características antes mencionadas son fundamentales para su selección como medios electrolíticos y lixiviantes para la recuperación de metales. Además, se ha encontrado que la solubilidad de las especies en los DES está parcialmente relacionada con el pH; mientras que los cloruros metálicos se disuelven preferentemente en DES que presentan características neutras, en el caso contrario, los óxidos metálicos tienen mayor solubilidad en DES ácidos. Lo anterior está fuertemente relacionado con los mecanismos de disolución de las especies que se centran en dos pasos: el primero implica la adsorción de ligandos aniónicos sobre la superficie de la especie metálica, que resulta en una formación de complejos, y el segundo consta de la disolución del complejo formado en la superficie de la solución del DES (Gholami *et al.*, 2025). En este sentido la electrodeposición metálica es una excelente opción para realizar procesos de recuperación de metales a partir de soluciones electrolíticas, ya que presenta ventajas como alta selectividad, alta pureza del material obtenido y al no generar residuos sólidos es bastante amigable con el medio ambiente; además, con el uso de esta técnica es posible retirar metales de los DES, lo que permite la reutilización de los mismos (Zhao *et al.*, 2025).

Recuperación de metales de pilas gastadas

Dentro de las investigaciones centradas en el uso de los DES para la recuperación de metales, mostrados en la Tabla 1, se encuentra el estudio de recuperación de plata (Ag) a partir de baterías de óxido de plata tipo botón, para el cual se utilizó una mezcla de cloruro de acetilcolina y urea como medio lixiviante y electrolítico, bajo condiciones experimentales de un tiempo de lixiviación de 24 horas a 70 °C (Sánchez *et al.*, 2021). Otro metal de transición como el cobalto (Co) se recuperó a partir de pilas gastadas de ion de litio (LiB) usando cloruro de colina y urea (reline); a partir del cátodo y lixiviando por 24 ho-

Tabla 1. Recuperación de metales empleando disolventes eutécticos profundos.

Materiales lixiviados	Elemento	DES	Recuperación/%	Referencia
Baterías de plata tipo botón	Ag	Reline	93	Sánchez <i>et al.</i> , 2021
Baterías de ion de litio	Co	Reline	-	Aldana <i>et al.</i> , 2022
Baterías alcalinas	Mn y Zn	Reline	-	Aldana <i>et al.</i> , 2022
Baterías níquel-metal hidruro	Ni y Co	Reline	64 y 36	Landa <i>et al.</i> , 2020
		Cloruro de colina/ácido salicílico	97	Varghese <i>et al.</i> , 2024
Imanes permanentes	Nd	Etilenglicol y ácido maleico	28	Yang <i>et al.</i> , 2024
		Reline y ethaline	-	Hernández, 2024

ras a 90 °C se encontró una concentración estimada de Co (II) de 23.3 ± 0.7 mM (Aldana *et al.*, 2022). A partir del cátodo de las baterías alcalinas gastadas y usando como medio lixiviante un DES reline, se realizó la electrorecuperación de la aleación de Manganeso-Zinc (Mn-Zn) después de 20 horas a una temperatura de 70 °C (Aldana *et al.*, 2019). Utilizando el mismo DES reline se logró recuperar Ni y Co a partir de baterías gastadas de Ni-HM; dichos depósitos estaban formados por Ni y Co, lo que sugiere la formación de una aleación bimetálica sobre el electrodo de trabajo, esto fue comparado usando una concentración de 2 M de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y se demostró que con el DES fue factible recuperar dichos elementos con porcentajes altos (Landa *et al.*, 2020).

Recuperación de tierras raras de desechos electrónicos

En los últimos años, la recuperación de tierras raras (REE) ha sido de vital importancia para los investigadores, no sólo por sus aplicaciones, sino porque dichos elementos se encuentran en un bajo porcentaje en la corteza terrestres (Guo *et al.*, 2024). Enfocándose en el uso de los DES, existen pocas investigaciones sobre el empleo de estos disolventes, sin embargo, ha sido posible recuperar Nd a partir de polvos de imán permanentes de Nd-FeB gastados usando ácido salicílico (SA) y cloruro de colina (ChCl) a 60 °C y 200 rpm (Varghese *et al.*, 2024).

Asimismo, se ha realizado la extracción selectiva de Nd de los imanes de NdFeB usando etilenglicol (EG) y

ácido maleico en condiciones de 80 °C, 5 horas y 700 rpm (Yang *et al.*, 2024). Finalmente, se ha demostrado que es posible electrorecuperar Nd y Fe a partir de imanes gastados de discos duros de computadoras empleando dos DES, utilizando reline, cloruro de colina y etilenglicol (ethaline).

Además de lograr recuperar dichos elementos, se estudió el efecto de temperaturas de 25-70 °C en dicha recuperación, lo que abre un nuevo camino al desarrollo de métodos de extracción con enfoque ambiental (Hernández, 2024).

Conclusiones

Los disolventes eutécticos profundos (DES) son una alternativa viable, así como sostenible, para la recuperación de metales realizando un reciclaje de materiales de desechos de dispositivos electrónicos y baterías. Se ha demostrado que los porcentajes de recuperación de elementos metálicos son bastante prometedores, no obstante, es importante destacar que la investigación de estos disolventes está en una etapa muy temprana. Por lo anterior, es importante ampliar el campo de estudio para el desarrollo de nuevos DES y realizar la combinación con otras técnicas o explorar otro tipo de desechos.

Además, la optimización de parámetros, como tiempo de lixiviación, temperatura, condiciones hidrodinámicas y pH, es importante para determinar el efecto que esta optimización tiene sobre las tasas de recuperación de metales y su viabilidad en la implementación industrial.

Referencias

- Aldana, J., Landa, M., Hernández, D., Maldonado, B., Sánchez, W., Montes de Oca, M. G., Romero, M. y Arce, E. M. (2024). Electronucleation and growth of metals from aqueous and non-aqueous solvents. *Nucleation and Growth in Applied Materials*, 65-100. doi: [10.1016/b978-0-323-99537-5.00013-1](https://doi.org/10.1016/b978-0-323-99537-5.00013-1)
- Aldana, J., Sampayo, A., Hernández, D., Montes de Oca, M. G., Arce, E. M., Ramírez, M. T., Morales, P., Romero, M., Mugica, V. y Palomar, M. (2022). Electrochemical nucleation and growth of cobalt after leaching waste lithium-ion batteries using a deep eutectic solvent. *Journal of The Electrochemical Society*, 169(10). doi: [10.1149/1945-7111/AC96B3](https://doi.org/10.1149/1945-7111/AC96B3)
- Aldana, J., Sampayo, A., Montes de Oca, M. G., Sánchez, W., Ramírez, M. T., Arce, E. M., Romero, M. y Palomar, M. (2019). Electrochemical nucleation and growth of mn and Mn-Zn alloy from leached liquors of spent alkaline batteries using a deep eutectic solvent. *Journal of the Electrochemical Society*, 166. doi: [10.1149/2.0761906jes](https://doi.org/10.1149/2.0761906jes)
- Dutta, D., Rautela, R., Gujjala, L. K. S., Kundu, D., Sharma, P., Tembhare, M. y Kumar, S. (2023). A review on recovery processes of metals from e-waste: a green perspective. *Science of the Total Environment*, 859. doi: [10.1016/J.SCITOTENV.2022.160391](https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.160391)
- Gholami, S., Pérez-Page, M., D'Agostino, C. y Esteban, J. (2025). (Deep) eutectic solvents for the separation of platinum group metals and rare earth elements: characteristics, extraction mechanisms and state of the art. *Chemical Engineering Journal*, 505. doi: [10.1016/J.CEJ.2025.159497](https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2025.159497)
- Guo, M., Deng, R., Gao, M., Xu, C. y Zhang, Q. (2024). Sustainable recovery of metals from e-waste using deep eutectic solvents: advances, challenges, and perspectives. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 47. doi: [10.1016/J.COOGSC.2024.100913](https://doi.org/10.1016/J.COOGSC.2024.100913)
- Hernández, D. (2024). Electrodepósito de neodimio a partir de desechos electrónicos empleando disolventes eutécticos profundos [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Landa, M., Aldana, J., Montes de Oca, M. G., Romero, M., Arce, E. M. y Palomar, M. (2020). Ni-Co alloy electrodeposition from the cathode powder of Ni-MH spent batteries leached with a deep eutectic solvent (reline). *Journal of Alloys and Compounds*, 830. doi: [10.1016/j.jallcom.2020.154650](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154650)
- Sánchez, W., Aldana, J., Manh, T., Romero, M., Mejía, I., Ramírez, M. T., Arce, E. M., Mugica, V. y Palomar, M. (2021). A deep eutectic solvent as leaching agent and electrolytic bath for ilver recovery from spent silver oxide batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 168(1). doi: [10.1149/1945-7111/ABDB01](https://doi.org/10.1149/1945-7111/ABDB01)
- Shahabuddin, M., Uddin, M. N., Chowdhury, J. I., Ahmed, S. F., Uddin, M. N., Mofijur, M. y Uddin, M. A. (2023). A review of the recent development, challenges, and opportunities of electronic waste (e-waste). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(4), 4513-4520. doi: [10.1007/S13762-022-04274-W](https://doi.org/10.1007/S13762-022-04274-W)
- Smith, E. L., Abbott, A. P. y Ryder, K. S. (2014). Deep eutectic solvents (DES) and their applications. *Chemical Reviews*, 114(21), 11060-11082. doi: [10.1021/cr300162p](https://doi.org/10.1021/cr300162p)
- Varghese, A. T., Malar, C. G., Seenuvasan, M. y Jayapradha, V. (2024). Neodymium recovery from permanent magnets: a breakthrough approach using deep eutectic solvents and mica. *Journal of Molecular Liquids*, 394. doi: [10.1016/j.molliq.2023.123690](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123690)
- Yang, Q., Li, Y., Li, B., Duan, P., Ren, Z. y Zhou, Z. (2024). Selective leaching and recovery of neodymium from NdFeB carbonyl residues. *Separation and Purification Technology*, 329. doi: [10.1016/j.seppur.2023.125137](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125137)
- Zhao, W., Huang, J., Fu, Y., Yue, T. y Hu, W. (2025). Comparison study of three universal methods for the recovery and purification of valuable heavy metals from electroplating sludge. *Separation and*

Purification Technology, 352. doi: [10.1016/j.seppur.2024.128009](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128009)

Zheng, S., Yang, S., Chen, J., Wu, D., Qi, B., Zhang, C., Deng, W., Li, J., Mei, T., Wang, S. y Wan, L. (2024). New progresses in efficient, selective, and environmentally friendly recovery of valuable metal from e-waste and industrial catalysts. *Advanced Sustainable Systems*, 8(6). doi: [10.1002/adsu.202300512](https://doi.org/10.1002/adsu.202300512)

¿Cómo se diseñan los edificios importantes para resistir sismos?

José Alberto Rodríguez Morales

Universidad Nacional Autónoma de México

jrodriguezm@iingen.unam.mx

Jonathan De Anda Gil

Universidad Nacional Autónoma de México

jandag@iingen.unam.mx

Sonia E. Ruiz Gómez

Universidad Nacional Autónoma de México

sruizg@iingen.unam.mx

Resumen

Imagina que ocurre un terremoto intenso en tu ciudad. Los edificios ordinarios (oficinas, locales comerciales o viviendas) podrían sufrir daños, pero hay otros que definitivamente deben seguir funcionando: hospitales atendiendo heridos, estaciones de bomberos respondiendo emergencias, escuelas que sirven como refugios temporales y estaciones de transporte para evacuar personas. Estos edificios esenciales o importantes deben mantenerse operativos cuando más se necesitan; por ello, cuando los ingenieros estructurales los diseñan, deben seguir reglas mucho más estrictas que las que se aplican en construcciones ordinarias.

Palabras clave

Sismos, edificios importantes, funcionalidad y ocupación inmediata.

Abstract

Imagine an intense earthquake strikes your city. While ordinary buildings (offices, commercial stores, or residences) might suffer damage, there are others that must absolutely continue functioning: hospitals treating the injured, fire stations responding to emergencies, schools serving as temporary shelters, and transportation stations for evacuating people. These essential or important buildings must remain operational when they are needed most. That's why when structural engineers design them, they must follow much stricter standards than those used for ordinary construction.

Keywords

Earthquakes, essential buildings, functionality, immediate occupancy.

Rodríguez, J., De Anda, J. y Ruiz, S. (2025). ¿Cómo se diseñan los edificios importantes para resistir sismos? *Azcatl*, 5, 17-20. DOI:

[10.24275/AZC2025B004](https://doi.org/10.24275/AZC2025B004)

Introducción

Cuando se diseña un edificio, los ingenieros estructurales deben seguir reglas específicas para garantizar que resista los sismos que se esperan en el futuro. Estas reglas son más estrictas para los llamados edificios esenciales —hospitales, escuelas, estaciones de bomberos o terminales de transporte— que para los edificios ordinarios, ya que su funcionamiento después de un sismo intenso es crucial para salvar vidas y organizar la respuesta durante la emergencia.

Para brindar mayor protección a los edificios importantes, los códigos de diseño sísmico alrededor del mundo incorporan un concepto conocido como *factor de importancia*, el cual incrementa las fuerzas que deben considerarse en el diseño estructural. Es como colocarles un chaleco antibalas extra, lo que les proporciona un mayor margen de seguridad frente al colapso.

Aprendiendo de los sismos del pasado

Los códigos de diseño se van mejorando con el tiempo. Los ingenieros analizan lo ocurrido en terremotos anteriores y usan esos conocimientos para desarrollar mejores especificaciones de diseño. Además, incorporan nuevas tecnologías y descubrimientos científicos para contribuir a la seguridad de las estructuras. Una de las

lecciones más importantes que hemos aprendido de sismos intensos recientes es que no sólo importa que el edificio no colapse, sino que se debe garantizar que continúe funcionando. Muchas veces, aunque la estructura principal (columnas, vigas, muros y losas) no sufra daños, el edificio no puede funcionar debido a que se dañan otros componentes como:

- tuberías (agua, gas y oxígeno);
- sistemas eléctricos;
- elevadores;
- techos y muros falsos;
- equipos especializados.

Estos componentes se conocen como elementos no estructurales (ver Figura 1), los cuales, aunque no sostienen el edificio, son esenciales para que éste funcione. En muchos casos, estos elementos representan un gran porcentaje del costo total de la construcción, especialmente en hospitales.

Las nuevas especificaciones de diseño de la Ciudad de México

En la Ciudad de México, las reglas de construcción antisísmica se incluyen en las Normas Técnicas Comple-

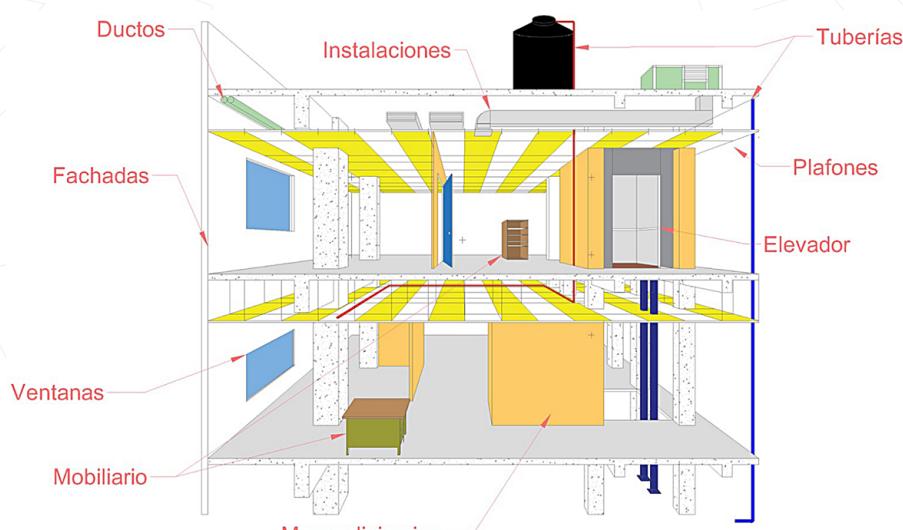


Figura 1.

mentarias para Diseño por Sismo (NTC-DS) que se modificaron significativamente en el año 2023. Veamos cómo era antes y cómo es ahora.

La norma anterior: más fuerte es mejor

Los edificios importantes se diseñaban empleando el *factor de importancia* y se dividían en dos categorías:

- Subgrupo A1: Los más críticos (hospitales grandes y centros de emergencia principales).
- Subgrupo A2: Importantes, pero menos críticos que los anteriores (escuelas, estadios y auditorios).

Los edificios diseñados bajo este enfoque seguían la misma filosofía que las construcciones ordinarias, con una sola diferencia: debían resistir fuerzas sísmicas mayores. La lógica era simple aunque limitada, se trataba de una regla de tres básica aplicada a la ingeniería sísmica. Si un edificio normal debe soportar una fuerza X, entonces una estructura del subgrupo A1 debe soportar 1.5X y un edificio del subgrupo A2 debe resistir 1.3X. No obstante, ambos tipos de edificios se diseñaban bajo la misma premisa fundamental que aceptaba que sufrieran daños durante un sismo intenso, siempre y cuando no colapsaran.

Esta filosofía de *daño aceptable* funciona para edificios ordinarios, donde el objetivo principal es salvar vidas evitando a las personas, pero para edificios esenciales presenta un problema crítico: un hospital dañado no puede atender emergencias, una estación de bomberos dañada no puede responder a incendios y una escuela dañada no puede servir como refugio.

En resumen, el enfoque anterior protege la vida de las personas dentro del edificio, sin embargo, no garantiza que el edificio cumpla su función después del sismo, justo cuando más se necesita.

La nueva norma: controlar las deformaciones

Con base en las lecciones aprendidas de sismos recientes alrededor del mundo, las nuevas NTC-DS cambiaron completamente el enfoque. Ahora todos los edificios importantes, sin importar si son A1 o A2, deben cumplir

con un nivel de desempeño llamado *ocupación inmediata* (OI). El término nivel de desempeño es una manera de expresar cómo se espera que se comporte una construcción ante un sismo, es decir, que tenga ciertas características. Por ejemplo, un edificio que se diseñe para cumplir el nivel de desempeño de OI debe sufrir daños estructurales prácticamente nulos ante un terremoto que estadísticamente ocurre cada 250 años en promedio; además, no sólo debe mantenerse en pie, sino estar listo para ser usado inmediatamente después del sismo, sin necesidad de reparaciones o inspecciones prolongadas.

Adicionalmente, las estructuras importantes deben satisfacer otro nivel de desempeño llamado *seguridad de vida* (SV), cuyo objetivo de diseño es que el edificio no se deforme permanentemente y esté muy lejos de colapsar ante la ocurrencia de un sismo que ocurre cada 475 años en promedio, con el objetivo de garantizar la evacuación segura de personas.

El desafío de los elementos no estructurales

Aunque un edificio se diseñe para que sus elementos estructurales cumplan el nivel de desempeño de OI, esto podría no funcionar si se dañan las tuberías, las instalaciones eléctricas o el equipo especializado. Por ejemplo, un hospital puede tener sus columnas, tráves y muros perfectamente intactos después de un sismo intenso, pero si se rompen las líneas de oxígeno, se desconectan los equipos de emergencia o colapsan los techos falsos sobre los equipos médicos, el hospital no puede funcionar y quizás eso impida que se salven algunas vidas, es decir, la estructura sobrevivió, no obstante, el edificio murió funcionalmente.

En este sentido, incluso con un diseño sísmico avanzado, la correcta ejecución y supervisión de la obra son indispensables para garantizar la seguridad y funcionalidad del edificio, de lo contrario, deficiencias en el proceso constructivo, interpretaciones erróneas de los planos o simplemente el uso de materiales inadecuados pueden comprometer su integridad estructural y su operación a lo largo de su vida útil. A esto se suma que, en ocasio-

nes, los usuarios destinan espacios para un uso distinto a lo previsto en el diseño, lo que puede generar sobrecargas o esfuerzos no contemplados. Por ello, resulta fundamental que exista un adecuado control sobre el uso de los inmuebles.

Conclusiones

La evolución de las normas de diseño sísmico en la Ciudad de México marca un punto de inflexión en la ingeniería estructural moderna. El cambio de las NTC-DS en 2023 no es sólo una actualización técnica, sino una transformación conceptual que redefine qué significa verdaderamente proteger un edificio esencial.

La eliminación del *factor de importancia* y el paso al diseño para control de daños representa un salto cualitativo; ya no se busca que los edificios esenciales simplemente sobrevivan, sino que mantengan su capacidad de servicio cuando la sociedad más los necesita. Esta filosofía reconoce que la verdadera medida del éxito no es evitar el colapso, sino garantizar la continuidad funcional.

El nuevo enfoque de la norma mexicana representa un desafío ingenieril fascinante: los edificios más rígidos y resistentes pueden generar mayores fuerzas sobre los elementos no estructurales. Esto requiere un diseño integral donde la protección de la estructura principal debe equilibrarse cuidadosamente con la protección de todos los sistemas que determinan la funcionalidad del edificio.

Los sismos recientes alrededor del mundo han demostrado que el daño a elementos no estructurales puede inutilizar completamente edificios con estructuras intactas. La incorporación de estas lecciones en las normas mexicanas posiciona al país como pionero en el diseño de infraestructura resiliente.

Adicionalmente, aunque los edificios esenciales con mayor desempeño sísmico implican un mayor costo inicial, a lo largo de su vida útil esta inversión contribuye a reducir daños, minimizar interrupciones y garantizar un beneficio económico y funcional sostenido. En otras palabras, este costo permite que la edificación cumpla con su función estratégica en situaciones de emergencia, mantenga su operación tras eventos sísmicos de gran magnitud y garantice la seguridad tanto de los ocupantes como de la infraestructura.

Referencias

Gobierno de la Ciudad de México (2022). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (última reforma). https://data.conseria.cdmx.gob.mx//images/leyes/reglamentos/RGTO_DE_CONSTRUCCIONES_DEL_DISTRITO_FEDERAL_8.pdf

Gobierno de la Ciudad de México (2023). Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo (NTC-DS-2020). Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

Gobierno del Distrito Federal (2020). Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo (NTC-DS-2020). Gaceta Oficial del Distrito Federal.

Vidrios que amplifican la luz: explorando nuevos materiales para las telecomunicaciones

Frida Lissete Flores Rivera

Universidad Autónoma Metropolitana,

Unidad Azcapotzalco

al2202803041@azc.uam.mx

Resumen

Existen diversas ramas de desarrollo en materiales; una de ellas, en particular, se enfoca en los vidrios ópticos, cuyo objetivo es mejorar sus características para emplearlos en el diseño de dispositivos ópticos como los amplificadores de luz, láseres y sensores presentes en la vida cotidiana, como es el caso de los sistemas de comunicaciones. La efectividad de estos vidrios para transmitir y amplificar luz se logra cuando se les añaden ciertos elementos llamados *tierras raras*. Esto es fundamental para conseguir comunicaciones más veloces y eficientes en nuestro mundo interconectado.

Palabras clave

Vidrios, tierras raras y amplificadores.

Abstract

One branch of materials development focuses on optical glass, aiming to improve its properties for use in the design of optical devices such as light amplifiers, lasers, and sensors, which are present in everyday life, as is the case with communication systems. The effectiveness of these glasses in transmitting and amplifying light is achieved by adding certain elements called «rare earth elements.» This is fundamental for achieving faster and more efficient communications in our interconnected world.

Keywords

Glasses, rare earth, amplifiers

APA: Flores, F. (2025). Vidrios que amplifican la luz: explorando nuevos materiales para las telecomunicaciones. *Azcatl*, 5, 21-25 DOI: [10.24275/AZC2025B008](https://doi.org/10.24275/AZC2025B008)

Cuando hacemos una videollamada, jugamos en línea, navegamos por redes sociales o vemos contenido en streaming, la luz juega un papel fundamental en la tecnología que hace posible todas estas actividades. Es la base de los sistemas modernos de telecomunicaciones, donde la información viaja a través de pulsos luminosos en fibras ópticas (Liu, X., 2019).

¿Cómo viaja toda la información que se transmite diariamente alrededor del mundo?

Los archivos, mensajes y videos que deseamos enviar se guardan en centros de datos que pueden ubicarse a miles de kilómetros de donde te encuentras. Para que toda esta información pueda llegar a dispositivos como teléfonos o computadoras portátiles son necesarios sistemas de transmisión confiables y veloces (Zhou *et al.*, 2018).

Quizá la primera idea que viene a la mente es que esta transmisión se realiza con tecnología satelital, sin embargo, la transmisión a largas distancias no es tan eficiente con esta tecnología, ya que se producen retardos significativos.

Para comprenderlo, veamos el procedimiento paso a paso: una señal se envía desde un centro de datos hasta un satélite por medio de una antena, el satélite recibe esta información y la reenvía a través de otra antena próxima al usuario. El inconveniente es que la señal tiene que viajar alrededor de 70 000 km (ida y vuelta al satélite), lo que produce demoras notables que hacen imposible su uso en aplicaciones que necesitan immediatez, como las videollamadas o los juegos en línea (Abdul *et al.*, 2025; Kushwah y Singhai, 2019).

Si la transmisión por satélite no es la opción más eficiente, ¿cómo llega realmente la información a los dispositivos?. La respuesta reside en una compleja red de cables de fibra óptica que interconecta centros de datos con usuarios en todo el mundo.

Aunque un teléfono se conecte a internet mediante redes Wi-Fi o celular, esto sólo sucede en la primera parte de la transmisión, la red principal de comunicación en realidad es por fibra óptica (Li y Nolan, 2008; TeleGeography, 2024).

La Figura 1 ilustra un cable de fibra óptica (filamento de vidrio cuyo diámetro es comparable al de un cabello humano) que se encuentra instalado en el lecho marino, formando parte de una vasta red de comunicación que une continentes. Estos cables son colocados por barcos especializados y se instalan con sumo cuidado en zanjas hechas en el fondo del mar para evitar que sufren daños. Por medio de dichos cables se transmiten pulsos de luz con información a velocidades asombrosas, convirtiéndose en el eje central del internet (zms Cable., 2023). Esta red no sólo cruza océanos, sino que también se despliega de otras formas, por ejemplo, bajo tierra, quedando protegida del clima y de posibles daños, y por tendidos de cables aéreos, con una instalación más sencilla pero vulnerable al viento y a otros factores del ambiente (Vaseli *et al.*, 2017; Grimado, 1991).

No obstante, para distancias superiores a decenas de kilómetros, la señal luminosa que viaja en las fibras ópticas se debilita y requiere ser reforzada. La solución para reforzarla se realiza mediante un proceso de amplificación, empleando, principalmente, dispositivos amplificadores de fibra óptica.



Figura 1. Cables submarinos de fibra óptica que conectan continentes. Nota: Tomado de zms Cable, 2023.

¿Alguna vez has escuchado hablar de los amplificadores de fibra óptica?

Los dispositivos más empleados para la amplificación de señales en los sistemas de comunicaciones ópticas son los amplificadores de fibra óptica. Para que una fibra

pueda amplificar señales es necesario añadirle elementos de tierras raras como el neodimio, tulio, erbio o iterbio. Esto es debido a que las tierras raras presentan escalones de energía que permiten la absorción de luz y su emisión posterior con gran eficiencia, casi como si fueran pequeñas baterías que se recargan y descargan de manera rápida (Atwood, 2012).

En este contexto el erbio es un elemento particularmente relevante porque amplifica la luz en la frecuencia en la que se transmiten gran parte de las señales de comunicaciones ópticas. Por esta razón, se incorpora como huésped en los vidrios de sílice con los que se elaboran las fibras ópticas, potenciando de esta manera su capacidad de transmitir y amplificar señales.

¿Cuál es el material con el que se elaboran los amplificadores de fibra óptica?

El dióxido de silicio o sílice (SiO_2) es el material más empleado para la elaboración de las fibras ópticas que conocemos, debido a que es muy abundante en la naturaleza y es un medio eficaz para dirigir la luz. Como se observa en la Figura 2, estas fibras de sílice son filamentos muy finos y puros.

No obstante, los vidrios de sílice también tienen sus desventajas, ya que para su fabricación es preciso exponerlos a temperaturas muy elevadas, superiores a las de un horno de pizza en su máxima potencia. Esto signifi-

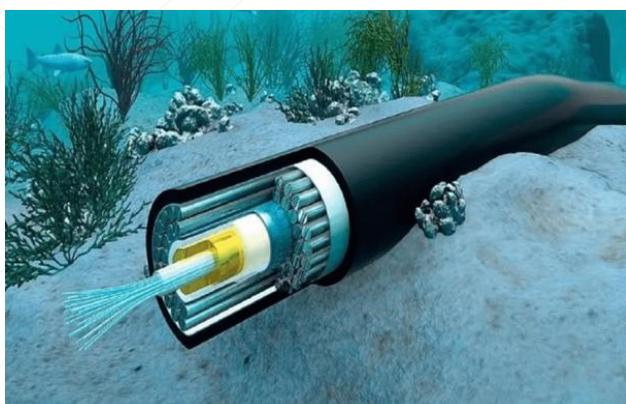


Figura 2. Fibras de vidrio de sílice que transmiten nuestra información. Nota: Tomada de ADSL Zone, 2023.

ca que se consume una gran cantidad de energía, lo que conlleva costos de producción altos.

Por ello es muy importante seguir investigando nuevos materiales que optimicen la transmisión de señales, disminuyan el consumo de energía durante su producción y mejoren la amplificación de las señales de luz (Frida *et al.*, 2022).

¿Cómo podemos mejorar estos amplificadores?

El camino para superar las restricciones de los vidrios de sílice parece ser una nueva familia de materiales muy eficientes y flexibles: los vidrios de fosfato de zinc, los cuales son una opción que está transformando la investigación en fibras ópticas.

Imagina el vidrio de sílice como un edificio de concreto, es resistente pero inflexible y caro de construir. Los vidrios de fosfato de zinc, en la actualidad, funcionarían como una estructura modular, tienen la misma funcionalidad que los vidrios de sílice pero son más económicos y adaptables de producir (Moguš-Milanković *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2010).

En la Figura 3 se muestran algunos vidrios de fosfato de zinc con erbio en la vida real. Gracias a su flexibilidad molecular, que es una consecuencia de su composición (oxígeno, zinc y fósforo), se producen con un menor consumo de energía (debido a que se funden a temperaturas más bajas), son muy transparentes para la luz que se utiliza en telecomunicaciones y actúan como un hogar eficaz para los iones de tierras raras que amplifican la señal (Rivera *et al.*, 2025).

Además, se tiene la posibilidad de optimizar estos vidrios incorporando pequeños compuestos que mejoren su comportamiento, como el óxido de sodio o el óxido de



Figura 3. Vidrios de fosfato de zinc con erbio

calcio, entre otros (Rivera *et al.*, 2025). Pensemos en estos óxidos como *componentes especiales* que fortalecen la estructura del vidrio, lo que lo hace más estable y sencillo de producir.

Resumiendo, estos progresos tienen un impacto directo en beneficios específicos para todos, el desarrollo de nuevos materiales para fibras ópticas implica tener acceso a un internet más veloz, estable y de menor consumo energético. Esto se traduce en experiencias diarias, como videollamadas de mejor calidad, acceso inmediato a la información y servicios digitales más eficientes.

La ciencia detrás de estos materiales, aunque sucede en laboratorios, termina impactando de forma muy real la manera en que vivimos y nos conectamos cada día.

Referencias

- Abdul, H. H., Ahmad, Y. A., Mohd, M. S. F. y Badron, K. (2025). Latency performance evaluation of LEO Starlink and SES-12 GEO HTS network under tropical conditions. *Journal of Network and Computer Applications*, 215, 103-115. <https://journals.iium.edu.my/ejournal/index.php/iijumej/article/view/3653>
- ADSLZone. (2023). *El mapa de los cables submarinos de internet: así viajan tus datos por el mundo*. <https://www.adslzone.net/reportajes/internet/mapa-cables-submarinos/>
- Atwood, D. A. (2012). *The rare earth elements: fundamental and applications*. Wiley.
- Flores, F. L., Medina, D. Y., Aldaya, I. y Pérez, G. G. (2022). Characterization of the optical gain in erbium-ytterbium-doped zinc and sodium-zinc phosphate glasses. *Optical Materials Express*, 12(11), 4491-4498. <https://doi.org/10.1364/OME.471665>
- Grimado, P. B. (1991). Dynamic characteristics of aerial fiber optic cable. *Optical Engineering*, 30(6), 761-768. <https://doi.org/10.1117/12.55862>
- Kushwah, R. S. y Singhai, J. (2019). Technological advancement in industrial satellite systems for achieving minimized propagation delay. *International Journal of Computer Networks & Communications*, 11(6), 47-59.
- Li, M. J. y Nolan, D. A. (2008). *Journal of Lightwave Technology*, 26(9), 1079-1092. https://www.researchgate.net/publication/3244500_Optical_Transmission_Fiber_Design_Evolution
- Liu, X. (2019). Evolution of fiber-optic transmission and networking toward the 5G era. *iScience*, 22, 489-506. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6920305/>
- Moguš-Milanković, A., Pavić, L., Reis, S. T., Day, D. E. y Ivanda, M. (2010). Structural and electrical properties of $\text{Li}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{P}_2\text{O}_5$ glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356(13), 715-719. https://www.researchgate.net/publication/258406269_Structural_and_Electrical_Properties_of_Li2O-ZnO-P2O5_Glasses
- Rivera, F. L. F., Pérez, G. G., Medina, D. Y., Aldaya, I., López, R. E., de Abreu, L. I. y Caldiño, U. (2025). Analysis of optical gain and attenuation coefficient in erbium-ytterbium-doped sodium-zinc phosphate glasses for integrated photonics applications. *Ceramics International*, 51(3), 4125-4135. https://www.researchgate.net/publication/385966728_Analysis_of_optical_gain_and_attenuation_coefficient_in_erbium-ytterbium-doped_sodium-zinc_phosphate_glasses_for_integrated_photonics_applications
- Silva, A. M. B., Correia, R. N., Oliveira, J. M. M. y Fernández, M. H. V. (2010). Structural characterization of $\text{TiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{CaO}$ glasses by spectroscopy. *Journal of the European Ceramic Society*, 30(6), 1253-1258. https://www.researchgate.net/publication/223728292_Structural_characterization_of_TiO2-P2O5-CaO_glasses_by_spectroscopy
- TeleGeography. (2024). *Submarine cable map*. <https://www.submarinecablemap.com/>
- Vaseli, H., Hashemian, L., Bayat, A., Gay, L., Williams, I. y Melzer, J. (2017). Evaluation of fiber optic installation methods, a case study on micro-trenching in Alberta, Canada. *FACETS*, 2(2), 642-659. <https://doi.org/10.1139/facets-2016-0043>
- Zhou, X., Liu, H., Urata, R. y Zebian, S. (2018). Scaling large data center interconnects: challenges and solu-

- tions. *Optical Fiber Technology*, 44, 61-68. https://www.researchgate.net/publication/320570448_Scaling_large_data_center_interconnects_Challenges_and_solutions
- zms Cable. (2023). ¿Cómo se coloca un cable de fibra óptica submarina? <https://zmscable.es/como-colocar-fibra-optica-submarina/>

A large, abstract graphic in the background consists of several overlapping circles and rectangles in white and light gray, creating a complex, gear-like pattern.

La contaminación atmosférica: un aumento en las zonas metropolitanas

Mariana Guevara Martínez

Universidad Autónoma de Tamaulipas

a2153140127@alumnos.uat.edu.mx

Jailene Marlen Jaramillo Pérez

Universidad Autónoma de Tamaulipas

a2163010061@alumnos.uat.edu.mx

Bárbara Azucena Macías Hernández

Universidad Autónoma de Tamaulipas

bmaciash@docentes.uat.edu.mx

Resumen

En los últimos años, la contaminación del aire se ha intensificado, presentando altos niveles de concentración de contaminantes en la atmósfera asociados principalmente a diversas actividades antropogénicas, entre ellas el incremento de la industria, el auge del transporte vehicular, el uso de biomasa y otros combustibles sólidos como fuente de energía y la combustión de hidrocarburos fósiles, los cuales representan un riesgo para la salud pública al ocasionar enfermedades respiratorias, cardiovasculares y afecciones cutáneas. Además, generan impactos en el medio ambiente, como la intensificación del efecto invernadero, el calentamiento global y, por ende, el cambio climático. Por lo anterior, es importante desarrollar estrategias integrales de gestión de la calidad del aire basadas en el control, prevención y reducción de contaminantes criterio, acciones sustentadas en el análisis de la calidad del aire a lo largo del tiempo y articuladas de manera complementaria con las políticas de mitigación y adaptación al cambio climático.

Palabras clave

Contaminación del aire, calidad del aire, cambio climático y zonas metropolitanas.

Abstract

In recent years, air pollution has intensified, with high levels of pollutant concentrations in the atmosphere due to the increase in industry, the uncontrolled burning of biomass, and the combustion of fossil fuels. These pose a risk to public health, causing respiratory and cardiovascular diseases and skin conditions. They also lead to environmental impacts such as the intensification of the greenhouse effect, global warming, and, consequently, climate change. Therefore, it is

APA: Guevara, M., Jaramillo, J. y Macías, A. (2025). La contaminación atmosférica: un aumento en las zonas metropolitanas. *Azcatl*, 5, 26-32. DOI: [10.24275/AZC2025B005](https://doi.org/10.24275/AZC2025B005)

important to develop comprehensive air quality management strategies focused on the control, prevention, and reduction of criteria pollutants, grounded in the analysis of air quality over time and designed to complement climate change mitigation and adaptation policies.

Keywords

Air quality, air pollution, climate change, metropolitan areas.

Introducción

La contaminación del aire representa una de las problemáticas más importantes a nivel mundial, ya que hoy en día la mayor parte de la población en zonas urbanas se encuentra expuesta a altos niveles de contaminación que a menudo sobrepasan los límites máximos permisibles establecidos por entidades públicas (Kelly *et al.*, 2015). En 2019 el 50 % de las muertes a nivel mundial fue atribuido a la exposición prolongada a altos niveles de concentración de contaminantes del aire (Pozzer *et al.*, 2023). Los países desarrollados son sitios que ocupan los primeros lugares en emisiones de contaminantes atmosféricos (Hooper *et al.*, 2018) que provienen principalmente de actividades antropogénicas y pueden ser agrupados según las fuentes que los generan; en este sentido, se han clasificado cuatro categorías principales: fuentes puntuales que incluyen plantas industriales, centrales eléctricas, refinerías e incineraciones municipales. Las fuentes de área contienen algunas imprentas o gasolineras; también existen las fuentes móviles, las cuales engloban los automóviles, líneas aéreas y ferrocarriles. Dentro de las fuentes de área se incluyen también las de origen natural, como los incendios, la erosión volcánica, las tormentas de polvo y las quemas agrícolas (Manosalidis *et al.*, 2020). Las fuentes anteriormente mencionadas han ocasionado episodios de contaminación que, a su vez, han agravado la calidad del aire en nuestro planeta, generando un gran impacto en la salud de los seres humanos (Perera y Nadeau, 2022; Ofremu *et al.*, 2024).

Dichas emisiones han provocado cambios sustanciales en el clima del planeta, por ejemplo, variaciones en la temperatura, olas de calor, alteraciones en la frecuencia de precipitaciones, una mayor frecuencia de incendios forestales y el derretimiento de los mantes glaciares.

Actualidad de la contaminación del aire

La contaminación del aire se caracteriza por la presencia de altas concentraciones de gases y partículas acumulables en la atmósfera (Goossens *et al.*, 2021; Pagano y Barbierato, 2024). En consecuencia, se ha convertido en un fenómeno de gran relevancia a nivel global, debido al crecimiento poblacional, urbano e industrial, que a su vez ocasiona efectos negativos en la salud pública y los ecosistemas (Manosalidis *et al.*, 2020; Hilly *et al.*, 2024). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (oms) (2024), al año mueren al menos 4.2 millones de personas debido a la mala calidad del aire. Como referencia, en la Figura 1 podemos observar la tasa de mortalidad a nivel mundial atribuible a la contaminación a través del tiempo, ya que debido a la alta concentración de fuentes emisoras (industriales, vehiculares y de servicios) se favorece que, con frecuencia, los límites máximos permisibles establecidos por las normas sean rebasados.

Zonas metropolitanas

Las zonas metropolitanas se definen como un conjunto de más de dos municipios que contienen en su ciudad más de 50 mil habitantes, cuyas actividades o funciones rebasan los límites originalmente establecidos. Una de las características de estas zonas es que incorporan como parte de sí mismas, o del área que abarcan, a municipios colindantes con los que comparten ciertas características como un alto grado de integración socioeconómica (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014). Las zonas metropolitanas son de gran importancia para el desarrollo de las grandes ciudades, ya que representan una de las principales fuentes de economía y demografía. Estas áreas se caracterizan principalmente por su crecimiento acelerado, su diversidad cultural y su

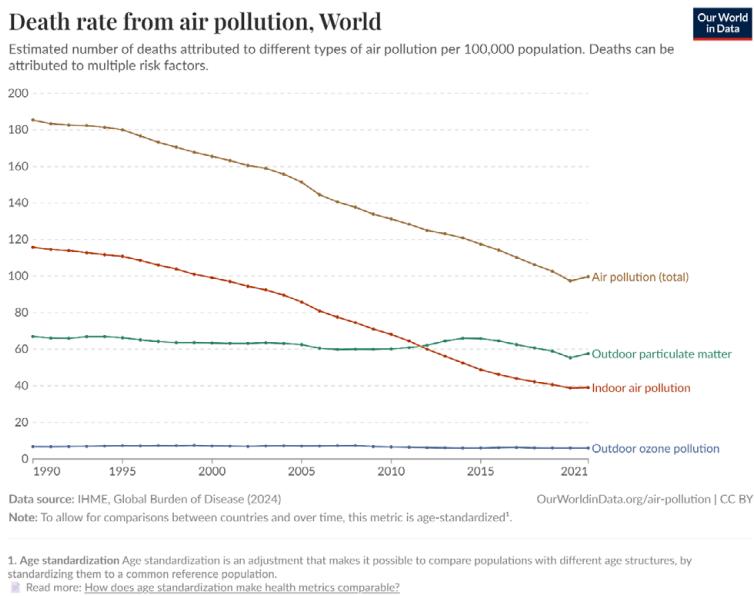


Figura 2. Tasa de mortalidad por contaminación del aire en el mundo. Fuente: IHME, Carga mundial de enfermedades (2024).

alta demanda de servicios y recursos (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano [SEDATU], 2020).

Contaminantes del aire y sus efectos en la salud

Históricamente se ha reportado que la contaminación en zonas metropolitanas está caracterizada por la presencia de compuestos como el PM_{2.5} y el PM₁₀, compuestos orgánicos volátiles (cov), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y monóxido de carbono (CO) (Meo *et al.*, 2024; Shen *et al.*, 2020; Khalili *et al.*, 2025), que a su vez contribuyen a la formación de componentes secundarios como el ozono troposférico, además de influir en los niveles de concentración de otros compuestos como el metano (CH₄), impactando de forma indirecta en el cambio climático (Cican *et al.*, 2024). Por otro lado, la presencia de contaminantes criterio ha generado una gran problemática a nivel mundial, ya que por sus características ocasionan efectos adversos en la salud de los seres humanos y de los ecosistemas. Entre los contaminantes más abundantes se encuentra el dióxido de nitrógeno (NO₂), generado principalmente por actividades humanas tales como la combustión de hidrocarbu-

ros fósiles, la quema no controlada de biomasa y las emisiones del parque vehicular urbano (Goldstein y Samuni, 2024; Wei *et al.*, 2024; Caselli, 2025; Ojeda *et al.*, 2025). Los altos niveles de concentración de este gas en la atmósfera están asociados con enfermedades respiratorias como el asma y accidentes cerebrovasculares (Kowalska *et al.*, 2020; Qian *et al.*, 2024). Otro contaminante muy presente en el ambiente es el dióxido de azufre (SO₂), el cual es emitido a la atmósfera mediante fuentes naturales (emisiones volcánicas e incendios forestales) (Carlsen *et al.*, 2021; Ren *et al.*, 2021) y por actividades antropogénicas (centrales eléctricas, industrias manufactureras y térmicas, quema de residuos agrícolas y combustión de gas natural (Li *et al.*, 2022; Mo *et al.*, 2022; Patiño *et al.*, 2024; Jindamanee *et al.*, 2024). La exposición prolongada a este gas puede causar diversas enfermedades respiratorias como bronquitis, asma, tuberculosis (Nie *et al.*, 2023), disminución de la función pulmonar y un mayor riesgo de mortalidad cardio o cerebrovascular (Orellano *et al.*, 2021; Meo *et al.*, 2024). Otro contaminante que destaca es el monóxido de carbono (CO); en cuanto a su origen, se genera principalmente por la quema de biomasa, el tratamiento y extracción de gas natural,

la combustión incompleta en motores de gasolina y diésel, así como por actividades de la industria metalúrgica y procesos de soldadura, reparación y mantenimiento de motores (Cheng *et al.*, 2021; Savioli *et al.*, 2024). En términos de salud, el CO es un gas tóxico que puede causar accidentes cerebrovasculares y enfermedades que afectan el sistema respiratorio, como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y la dificultad respiratoria crónica (Bilska-Wilkosz *et al.*, 2022; Meo *et al.*, 2024).

Factores que influyen en la contaminación atmosférica

En este sentido, la contaminación del aire está asociada a las actividades humanas, sin embargo, su permanencia y concentración dependen de los factores geográficos y meteorológicos, los cuales afectan la distribución de contaminantes en las zonas urbanas, tal y como se muestra en la Figura 2 (Manosalidis *et al.*, 2020). Por lo cual, Behera y Gokhale (2025) señalan que las zonas montañosas actúan como barreras naturales, modifican la velocidad del viento y alteran los patrones del flujo de aire,

por lo que este factor favorece la acumulación de contaminantes, lo que provoca una mala calidad del aire (Karami *et al.*, 2025). Por su parte, los factores meteorológicos determinan la capacidad de dispersión de un contaminante en la atmósfera, esta dinámica está influenciada principalmente por parámetros como la temperatura, la humedad relativa, la presión barométrica, la velocidad y la dirección de viento, es decir, las condiciones meteorológicas favorables contribuyen a la limpieza del aire mediante la abundante precipitación (Rowland, 2024; Jiang y Jin, 2025; Lorinț *et al.*, 2025; Bai *et al.*, 2025).

Uso de redes de monitoreo atmosférico

Las redes de monitoreo atmosférico forman parte de un sistema de observación, monitoreo y evaluación de datos de la calidad del aire que permite establecer estándares y criterios técnicos para una adecuada gestión ambiental (García *et al.*, 2025). La información generada por estas redes no contribuye por sí sola a la mitigación y adaptación, pero constituye un insumo fundamental para diseñar, ajustar y evaluar las acciones de control de emi-



Figura 2. Factores que influyen en una mala calidad del aire.

Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2019).

siones y otras medidas de gestión, así como para valorar la eficacia de las estrategias de mitigación y adaptación frente al cambio climático. No obstante, el monitoreo de la calidad del aire presenta múltiples desafíos que limitan su análisis. Las estaciones de monitoreo atmosférico requieren un alto costo de instalación, calibración y mantenimiento, además de personal técnico capacitado para garantizar la calidad y la continuidad de los datos, lo que implica un mayor gasto operativo y un retraso en el monitoreo (Sokolova *et al.*, 2025).

Conclusiones

La contaminación del aire en zonas metropolitanas representa un problema urgente en materia de salud pública y medio ambiente; impulsada principalmente por fuentes antropogénicas como el transporte, la industria y la quema de combustibles. Compuestos como el NO₂, SO₂ y CO afectan gravemente la salud humana y contribuyen al cambio climático. Además, factores geográficos y meteorológicos influyen en su dispersión, lo que agrava su impacto. Aunque existen redes de monitoreo, sus limitaciones técnicas y operativas dificultan una gestión eficiente, por lo que es indispensable fortalecer las políticas públicas, el monitoreo ambiental y las estrategias de prevención para reducir estos efectos negativos.

Referencias

- Afzal, M., Agarwal, S., Elshaikh, R. H., Babker, A. M. A., Choudhary, R. K., Prabhakar, P. K., Zahir, F. y Sah, A. K. (2025). Carbon monoxide poisoning: diagnosis, prognostic factors, treatment strategies, and future perspectives. *Diagnostics*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/diagnostics15050581>
- Behera, N. y Gokhale, S. (2025). Understanding meteorological factors influencing heavy air pollution in Guwahati, India. *Atmospheric Pollution Research*, 16(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102337>
- Bilska, A., Górný, M. e Iciek, M. (2022). Biological and pharmacological properties of carbon monoxide: a general overview. *Oxygen*, 2(2), 130-151. <https://doi.org/10.3390/oxygen2020012>
- Carlsen, H. K., Valdimarsdóttir, U., Briem, H., Domínguez, F., Finnbjörnsdóttir, R. G., Jóhannsson, T., Aspelund, T., Gislason, T. y Gudnason, T. (2021). Severe volcanic SO₂ exposure and respiratory morbidity in the Icelandic population: a register study. *Environmental Health*, 20(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s12940-021-00698-y>
- Caselli, M. (2025). Critical analysis of the results of a network system for nitrogen dioxide monitoring. *Sustainability*, 17(6). <https://doi.org/10.3390/su17062738>
- Cheng, Y., Yu, Q., Liu, J., Sun, Y., Liang, L., Du, Z., Geng, G., Ma, W., Qi, H., Zhang, Q. y He, K. (2021). Formation of secondary inorganic aerosol in a frigid urban atmosphere. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 16(2). <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1452-0>
- Cican, G., Mirea, R. y Căldăraru, M. (2024). Comparative analysis of aeroshell 500 oil effects on jet A and diesel-powered aviation microturbines. *Fuels*, 5(3), 347-363. <https://doi.org/10.3390/fuels5030020>
- García, A., Saez, Y., Harris, I., Huang, X. y Collado, E. (2025). Advancements in air quality monitoring: a systematic review of IoT-based air quality monitoring and AI technologies. *Artificial Intelligence Review*, 58(9), 275. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11277-9>
- Goldstein, S. y Samuni, A. (2024). Chemistry of nitrogen dioxide and its biological implications. *Redox Biochemistry and Chemistry*, 7. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rbc.2024.100020>
- Goossens, J., Jonckheere, A.-C., Dupont, L. J. y Bullens, D. M. A. (2021). Air pollution and the airways: lessons from a century of human urbanization. *Atmosphere*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/atmos12070898>
- Hilly, J. J., Singh, K. R., Jagals, P., Mani, F. S., Turagabeci, A., Ashworth, M., Mataki, M., Morawska, L., Knibbs, L. D., Stuetz, R. M. y Dansie, A. P. (2024). Review of scientific research on air quality and environmental health risk and impact for PICTS. *Science*

- of The Total Environment*, 942. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173628>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014). Las zonas metropolitanas de México. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ce/2014/doc/minimonografias/m_zmm_ce2014.pdf
- Jiang, J. y Jin, A. (2025). Study on the dispersion law of typical pollutants in winter by complex geographic environment based on the coupling of GIS and CFD: a case study of the Urumqi region. *Applied Sciences*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/app15052469>
- Jindamaneek, K., Thepanondh, S., Keawboonchu, J., Pintthong, N. y Meeyai, A. (2024). Manifesting the hidden pollutants: quantifying emissions and environmental impact of petroleum refinery on PM2.5. *Atmospheric Environment: X*, 24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2024.100300>
- Karami, S., Ghassabi, Z., Khoddam, N. y Habibi, M. (2025). Investigating meteorological factors influencing pollutant concentrations and copernicus atmosphere monitoring service (CAMS) model forecasts in the tehran metropolis. *Atmosphere*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/atmos16030264>
- Khalili, A., Vines, W. E. y Rifai, H. S. (2025). A place-based county-level study of air quality and health in urban communities. *Sustainability*, 17(12). <https://doi.org/10.3390/su17125368>
- Kowalska, M., Skrzypek, M., Kowalski, M. y Cyrys, J. (2020). Effect of NOx and NO2 concentration increase in ambient air to daily bronchitis and asthma exacerbation, silesian voivodeship in Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph17030754>
- Li, R., He, X., Wang, H., Wang, Y., Zhang, M., Mei, X., Zhang, F. y Chen, L. (2022). Estimating emissions from crop residue open burning in central China from 2012 to 2020 using statistical models combined with satellite observations. *Remote Sensing*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/rs14153682>
- Lorinț, C., Traistă, E., Florea, A., Marchiș, D., Radu, S. M., Nicola, A. y Rezmerița, E. (2025). Spatiotemporal distribution and evolution of air pollutants based on comparative analysis of long-term monitoring data and snow samples in Petroșani mountain depression, Romania. *Sustainability*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/su17073141>
- Manosalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A. y Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Meo, S. A., Salih, M. A., Alkhailah, J. M., Alsomali, A. H. y Almushawah, A. A. (2024). Environmental pollutants particulate matter (PM2.5, PM10), carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO2), sulfur dioxide (SO2), and ozone (O3) impact on lung functions. *Journal of King Saud University. Science*, 36(7). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103280>
- Mo, J., Gong, S., He, J., Zhang, L., Ke, H. y An, X. (2022). Quantification of SO₂ emission variations and the corresponding prediction improvements made by assimilating ground-based observations. *Atmosphere*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/atmos13030470>
- Nie, T., Chen, J., Ji, Y., Lin, T. y Wang, J. (2023). Impact of air pollution on respiratory diseases in typical industrial city in the North China plain. *Sustainability*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/su151411198>
- Ojeda, V., Murillo, M. A., Hernández, L., Saldarriaga, H., Vargas, M. E., Herrera, E. J. y Díaz, J. (2025). Tropospheric NO₂: anthropogenic influence, global trends, satellite data, and machine learning application. *Remote Sensing*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/rs17010049>
- Orellano, P., Reynoso, J. y Quaranta, N. (2021). Short-term exposure to sulphur dioxide (SO₂) and all-cause and respiratory mortality: a systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 150. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106434>
- Organización Mundial de la Salud. (2024). Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud. <https://doi.org/10.18449/OMS-2024-0001>

- [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Pagano, E. y Barbierato, E. (2024). A time series approach to smart city transformation: the problem of air pollution in Brescia. *AI*, 5(1), 17-37. <https://doi.org/10.3390/ai5010002>
- Patiño, M., Hernández, T., Panchana, C. y Borge, R. (2024). Source apportionment of ambient pollution levels in Guayaquil, Ecuador. *Heliyon*, 10(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31613>
- Perera, F. y Nadeau, K. (2022). Climate change, fossil-fuel pollution, and children's Health. *New England Journal of Medicine*, 386(24), 2303-2314. https://doi.org/10.1056/NEJMRA2117706/SUPPL_FILE/NEJMRA2117706_DISCLOSURES.PDF
- Pozzer, A., Anenberg, S. C., Dey, S., Haines, A., Lelieveld, J. y Chowdhury, S. (2023). Mortality attributable to ambient air pollution: a review of global estimates. *GeoHealth*, 7(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2022GH000711>
- Qian, Y., Cai, R., Su, X., Li, Q., Jin, S., Shi, W., Chen, R., Wang, C. y He, J. (2024). Residential nitrogen dioxide exposure and cause-specific cerebrovascular mortality: an individual-level, case-crossover study. *Toxics*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/toxics12010010>
- Ren, Y., Shen, G., Shen, H., Zhong, Q., Xu, H., Meng, W., Zhang, W., Yu, X., Yun, X., Luo, Z., Chen, Y., Li, B., Cheng, H., Zhu, D. y Tao, S. (2021). Contributions of biomass burning to global and regional SO₂ emissions. *Atmospheric Research*, 260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105709>
- Savioli, G., Gri, N., Ceresa, I. F., Piccioni, A., Zanza, C., Longhitano, Y., Ricevuti, G., Daccò, M., Esposito, C. y Candura, S. M. (2024). Carbon monoxide poisoning: from occupational health to emergency medicine. *Journal of Clinical Medicine*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/jcm13092466>
- Shen, F., Zhang, L., Jiang, L., Tang, M., Gai, X., Chen, M. y Ge, X. (2020). Temporal variations of six ambient criteria air pollutants from 2015 to 2018, their spatial distributions, health risks and relationships with socioeconomic factors during 2018 in China. *Environment International*, 137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105556>
- Sokolova, O., Yurgenson, A. y Shakhov, V. (2025). Development of air quality monitoring systems: balancing infrastructure investment and user satisfaction policies. *Sensors*, 25(3). <https://doi.org/10.3390/s25030875>
- Wei, S., Hong, Q., Tan, W., Chen, J., Li, T., Wang, X., Xue, J., Fang, J., Liu, C., Tanvir, A., Xing, C. y Liu, C. (2024). Spatiotemporal distribution, sources, and impact on atmospheric oxidation of reactive nitrogen oxides in the North China plain agricultural regions in summer. *Remote Sensing*, 16(17). <https://doi.org/10.3390/rs16173192>



Rizorremediación: cuando plantas y microorganismos se convierten en aliados en la recuperación del ambiente

Sofía Vite Velázquez

Universidad La Salle México

sofiavite@lasallistas.org.mx

Ricardo Solís Olivier

Universidad La Salle México

Ricardo.solis@lasallistas.org.mx

Alejandro Islas García

Universidad La Salle México

alejandro.islas@lasalle.mx

Vanessa Flores Mercado

Universidad La Salle México

vanessaflores@lasallistas.org.mx

Resumen

Con el desarrollo de la sociedad, los niveles de contaminación en el planeta han aumentado significativamente, lo que impacta gravemente a las diferentes matrices ambientales. Frente a este problema, la ciencia se encuentra en constante búsqueda de soluciones sostenibles y eficientes. Una de estas estrategias de solución es la rizorremediación, proceso natural que utiliza la actividad conjunta de las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo en la zona conocida como rizosfera para degradar los contaminantes presentes en el medio. A continuación se exponen los fundamentos de la rizorremediación y se abordan de manera breve algunas aplicaciones exitosas documentadas.

Palabras clave

Rizorremediación, suelo y rizosfera.

Abstract

With the development of society, levels of pollution on the planet have significantly increased, severely impacting different environmental aspects. Faced with this problem, science is constantly searching for sustainable, efficient solutions. One of the strategies employed is rhizoremediation, a natural process which uses the joint activity of plant roots and soil microorganisms in the zone known as rhizosphere to degrade pollutants present in the medium. The following section develops the fundamentals of rhizoremediation, followed by a brief overview of some documented successful applications.

Key words

Rhizoremediation, soil, rhizosphere.

APA: Flores, V., Solis, R., Vite, S. e Islas, A. (2025). Rizorremediación: cuando plantas y microorganismos se convierten en aliados en la recuperación del ambiente. *Azcatl*, 5, 33-38. DOI: [10.24275/AZC2025B001](https://doi.org/10.24275/AZC2025B001)

Introducción

A medida que nuestra sociedad se ha desarrollado, los niveles de contaminación en nuestro planeta han ido incrementado de forma significativa, lo que afecta gravemente a las diferentes matrices ambientales. En particular, el suelo está cada vez más expuesto a derrames de hidrocarburos, descargas de residuos industriales y al uso excesivo de pesticidas o sustancias químicas que lo degradan, siendo todas éstas las principales causas de contaminación del suelo. Estas acciones no sólo reducen su fertilidad y capacidad de sustentar cultivos, sino que también pueden tener consecuencias en la salud humana y animal al facilitar la entrada de sustancias tóxicas en la cadena alimentaria y en los cuerpos de agua cercanos.

Frente a este problema, la ciencia ha buscado soluciones con enfoques sostenibles y eficientes como la fitorremediación, la cual implica la acción de varios procesos que involucran plantas y a sus microorganismos asociados para remediar ambientes contaminados, especialmente suelo y agua. Una de las ramas de la fitorremediación de ecosistemas contaminados es la rizorremediación, la cual consiste en el aprovechamiento de la relación simbiótica entre plantas y organismos del suelo ubicados en la zona de las raíces, área denominada rizosfera (Figura 1). La rizosfera es el volumen del suelo directamente influenciado por las raíces de la planta, en esta zona se observa un aumento en la cantidad de microorganismos en comparación con el resto del suelo, esto se conoce como efecto rizósferico (Hartmann *et al.*, 2007). Este método de remediación, además de ser ecológico, resulta aplicable en distintas técnicas de restauración ambiental y puede considerarse como una alternativa con una relación costo-beneficio efectiva frente a otras tecnologías.

Fundamentos de la rizorremediación

Este microambiente constituye una zona altamente dinámica, en donde ocurren complejas interacciones físico-químico-biológicas entre las raíces, los microorganismos y el suelo. Siendo los microorganismos los que participan activamente en diversas actividades como la descomposición de materia orgánica, la solubilización de nutrientes y la producción de compuestos que favorecen

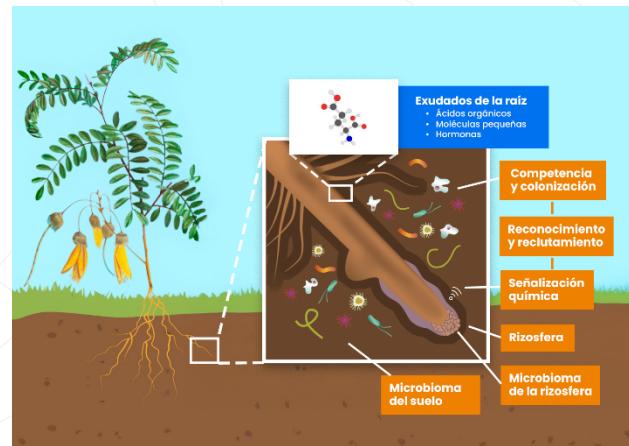


Figura 1. Representación de la rizosfera.

Nota: Adaptada de Collec Tara, 2021.

el crecimiento vegetal o protegen a la planta de agentes patógenos. En estos entornos se forma una red trófica microbiana, capaz de regular los procesos esenciales como el pH del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad de las biopelículas (Loera y Caamal, 2023).

De esta forma, las plantas pueden aprovechar las capacidades degradativas que poseen los microorganismos, mientras que éstos aprovechan los exudados radiculares (compuestos liberados por las raíces de las plantas) como fuente nutricional (Figura 1) (Holguín, 2008).

Ciertos tipos de exudados, como los carbohidratos, los ácidos carboxílicos y los aminoácidos, ayudan a la estimulación de los microorganismos presentes, lo que mejora la degradación de algunos contaminantes orgánicos. De esta manera, es en la rizosfera donde se encontrará toda la carga fitoquímica liberada por la planta, la zona donde se presenta la máxima actividad ejercida por los compuestos, o ejercida sobre ellos, como es el caso de la biodegradación. Así es el área que está siendo estudiada en búsqueda de los agentes verdaderamente activos (Oliveros *et al.*, 2009).

Los factores más importantes involucrados en la estimulación son la cantidad de oxígeno que reciben las raíces, la porosidad y permeabilidad del suelo, así como la liberación y tipo de los exudados radiculares de la planta (Massot, 2018).

La interacción entre el contaminante y los microorganismos dependerá del metabolismo y las enzimas que tengan en su sistema, presentándose desde la degradación, la volatilización o la fotooxidación de éstos, proceso que contribuyen en el ciclo de nutrientes que se lleva a cabo en el medio (Rodríguez, 2011).

Tipos de rizorremediación

Dentro de la rizorremediación existen diferentes tipos según la planta y los microorganismos que actúan sobre los contaminantes (Figura 2). El más común es la degradación, en la cual la raíz de la planta produce exudados que sirven como fuente de energía para los microorganismos del suelo, estimulando así su metabolismo. Estos

microorganismos emplean rutas enzimáticas específicas capaces de degradar compuestos orgánicos complejos, transformándolos en sustancias menos tóxicas o inofensivas. Además, dependiendo del tipo de contaminante y de las condiciones del entorno, las comunidades microbianas locales pueden adaptarse y desarrollar mecanismos metabólicos que favorecen la descomposición de hidrocarburos, pesticidas u otros compuestos persistentes (Dary, 2015).

Otra forma en la que se ocupa la rizorremediación es la estabilización, en la cual las plantas y sus microorganismos inmovilizan los contaminantes en el suelo, reduciendo su movilidad y biodisponibilidad. Este proceso ocurre mediante la adsorción, precipitación o formación de complejos con compuestos orgánicos o inorgánicos, producto de la actividad microbiana y del intercambio iónico en la rizosfera. En este caso, los microorganismos utilizan su metabolismo para modificar el pH o liberar sustancias que provocan la precipitación del contaminante, manteniéndolo en una forma estable y evitando que sea absorbido por las raíces o se disperse hacia otras zonas del suelo o el agua (Parra, 2017).

Ejemplos de sistemas biológicos que ayudan a limpiar el ambiente

En la actualidad, se han realizado diversos estudios para observar la interacción de la rizosfera con la remediación ambiental, en la Tabla 1 se pueden encontrar algunos ejemplos de microorganismos y los contaminantes que degradan. De igual forma, a continuación, se presen-

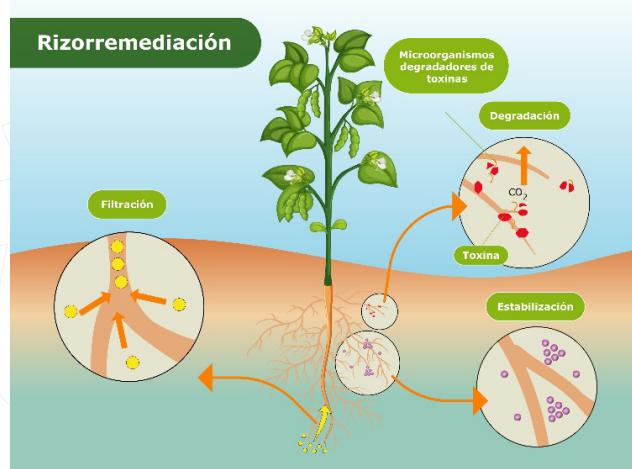


Figura 2. Representación de los tipos de rizorremediación.

Tabla 1. Bacterias asociadas a la rizosfera y contaminantes que degradan.

Especie	Contaminante	Porcentaje de degradación y tiempo de tratamiento	Referencia
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> . <i>Gordonia amicalis</i> .	Hidrocarburos totales de petróleo.	93.28 a 95.71 % y 60 días.	Bhuyan y Pandey, 2022.
<i>Bacillus licheniformis</i> . <i>Bacillus mojavensis</i> .	Hidrocarburos aromáticos policíclicos.	78 a 91 % y 90 días.	Eskandary et al., 2017.
<i>Bacillus safensis</i> .	Plaguicida nicotinoide.	50.98 a 57.86 % y 80 días.	Oke y Zunjarao, 2023.
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> y <i>Bacillus cereus</i> (consorcio).	Plaguicida organofosforado.	50 a 60 % y 4 días.	Mol, 2023.
<i>Microbacterium sp.</i>	Plaguicida organoclorado.	82.7 ± 1.79 % y 15 días.	Singh y Singh, 2019.

tan casos más específicos que se han llevado a cabo tanto nacional como internacionalmente.

Uribe *et al.* (2022) analizan el uso de dos tipos de pasto: *Megathyrsus maximus* y *Brachiaria decumbens* para la rizorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo (PHC). Los resultados demostraron que la comunidad microbiana de la rizosfera incrementó a los seis meses, además de la fertilidad del suelo, la porosidad, el fósforo disponible y la capacidad de intercambio catiónico. Aparte, se determinó que las plantas promovieron el desarrollo de las rizobacterias. Asimismo, se identificaron las interacciones entre las rizobacterias y los cambios que se presentaron en el suelo contaminado.

Mientras que en el artículo de Hidalgo *et al.* (2022) se expone que combinaron tres tratamientos: rizorremediación con *Brassica napus*, nanoremediación con nZVI (Zero-valent iron particles) y bioestimulación con desechos orgánicos para el tratamiento de suelos contaminados con Lindano y zinc metálico, dando como resultados una mayor cantidad de biomasa, actividad microbiológica y biodiversidad en el suelo, además de mejorar la salud del mismo.

De igual forma, Molina *et al.* (2021) identificaron que el trébol blanco (*Trifolium repens*) con la bacteria *Novosphingobium sp.* HR1a tienen la capacidad de remediar suelos contaminados con fenantreno, a partir de los exudados generados de la raíz del trébol como nutrientes.

Por otro lado, Zahid *et al.* (2015) investigaron el potencial de microorganismos nativos de suelos contaminados por derrames de petróleo en las raíces de la planta *Cannabis sativa* para la degradación de benceno. Se identificaron diversas especies de bacterias como *Pseudomonas aeruginosa*, siendo ésta la mejor con 85 % de degradación en 72 horas; además de reportarse por primera vez a *Acinetobacter junii* como degradador.

Finalmente, un estudio en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla evaluó la posibilidad de remediar un suelo contaminado con petróleo crudo empleando el nopal verdura (*Opuntia spp.*) con bacterias fijadoras de nitrógeno del género *Azospirillum spp.*, obteniéndose que la *Opuntia ficus* se puede adaptar y crecer en suelos con

presencia de petróleo crudo con la posibilidad de degradar más del 70 % de éste (Severiano, 2022).

Ventajas y limitaciones de la rizorremediación

La rizorremediación es una técnica eficaz para eliminar compuestos orgánicos dañinos y contaminantes como el petróleo o hidrocarburos. Esto sucede gracias a que los microorganismos presentes en la rizosfera degradan estos compuestos en partículas pequeñas y fáciles de remover del suelo.

Otra ventaja es que no se necesita agregar alguna sustancia para tratar la zona contaminada y, a largo plazo, mientras la rizosfera esté activa habrá un reciclaje continuo de nutrientes, así la eliminación de sustancias tóxicas continuará sin generar costos adicionales (Noor, 2023).

Sin embargo, esta técnica puede presentar algunas limitaciones. El proceso puede llegar a ser lento, especialmente donde la concentración de contaminantes es muy alta, por lo que la toxicidad también aumenta y puede dañar a los organismos involucrados en el proceso. Asimismo, puede existir el riesgo de que los contaminantes entren en la cadena alimentaria (Peralta y Volke, 2012.).

Conclusiones

La rizorremediación es presentada como una nueva alternativa viable para la recuperación de suelos contaminados a través de la interacción entre los microorganismos presentes en la rizosfera y las raíces de las plantas.

A diferencia de otros métodos de remediación que pueden llegar a ser más invasivos y costosos, esta estrategia utiliza a su favor los procesos que ocurren de manera natural, promoviendo la diversidad microbiiana, destacando algunas especies con gran capacidad de adaptación y fomentando el uso de especies nativas.

Cabe mencionar que para lograr esto de manera eficiente se requieren de diversos estudios, ya que es de suma importancia no afectar de manera negativa los ecosistemas. Además, la actividad microbiana cambia a lo largo del tiempo, viéndose influida por factores como los tipos de plantas, disponibilidad de nutrientes, concentra-

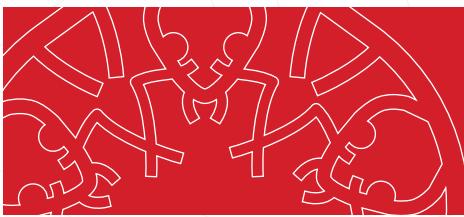
ción de contaminantes, entre otros, para lo cual se requiere de monitoreo antes de implementar esta estrategia.

En este sentido, se sugiere realizar más investigaciones y estudios para entender el comportamiento de este proceso de remediación en diferentes ambientes, así como de estrategias complementarias para su aplicación.

Referencias

- Bhuyan, B. y Pandey, P. (2022). Remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil using hydrocarbonoclastic rhizobacteria, applied through *Azadirachta indica* rhizosphere. *International Journal of Phytoremediation*, 24(13), 1444-1454. <https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2033689>
- Collec Tara. (2021). *Productos microbiológicos para cultivos*. <https://collectara.com/>
- Dary, M. (2015). *La simbiosis rizobio-leguminosa como bioherramienta para la fitorremedación de suelos contaminados con metales pesados* [Tesis doctoral]. Universidad de Sevilla. <http://hdl.handle.net/11441/34233>
- Eskandary, S., Tahmourespour, A., Hoodaji, M., y Abdollahi, A. (2017). The synergistic use of plant and isolated bacteria to clean up polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soil. *Journal of environmental health science and engineering*, 15(12). <https://doi.org/10.1186/s40201-017-0274-2>
- Hartmann, A., Rothballer, M. y Schmid, M. (2007). Lorenz Hiltner, a pioneer in rhizosphere microbial ecology and soil bacteriology research. *Plant and Soil*, 312, 7-14. [10.1007/s11004-007-9514-z](https://doi.org/10.1007/s11004-007-9514-z).
- Hidalgo, J., Anza, M., Epelde, L., Becerril, J. M., y Garbisu, C. (2022). Zero-valent iron nanoparticles and organic amendment assisted rhizoremediation of mixed contaminated soil using *Brassica napus*. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102621. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186422001808?via%3Dhub>
- Loera, A. y Caamal, M. G. (2023). Biopelículas en la rizosfera y su papel en la producción de compuestos antimicrobiales en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1733>
- Massot, F. (2018). *Estrategias de rizorremediación de glifosato en suelos bajo explotación agrícola intensiva* [Tesis doctoral]. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Farmacia y Bioquímica. <http://hdl.handle.net/11336/80306>
- Mol, S. R. (2023). Role of rhizosphere associated bacteria in biodegradation. *ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts*, 4(2), 3613-3624. <https://doi.org/10.29121/shodhkosh.v4.i2.2023.3839>
- Molina, L., Udaondo, Z., Montero, M., Wittich, R., García, A. y Segura, A. (2021). Clover root exudates favor *Novosphingobium sp.* HR1a. Establishment in the rhizosphere and promote phenanthrene rhizoremediation. *mSphere*, 6(4). <https://journals.asm.org/doi/10.1128/msphere.00412-21>
- Noor, H. (2023). *What is rhizoremediation? Methods, benefits and drawbacks*. ENVPK. <https://www.envpk.com/what-is-rhizoremediation-methods-benefits-and-drawbacks/#:~:text=Benefits%20of%20Rhizoremediation%3A,easily%20removed%20from%20the%20soil>.
- Oberai, M. y Khanna, V. (2018). Rhizoremediation–plant microbe interactions in the removal of pollutants. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(1), 2280-2287. <https://www.ijcmas.com/abstractview.php?ID=6226&vol=7-1-2018&SNo=276>
- Oke, R. S. y Zunjarao, R. (2023). Degradation of imidacloprid from polluted soil by rhizosphere microflora, *Bacillus safensis* isolated from sunflower (*Helianthus annuus*). *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 10(12), 776-783. https://www.researchgate.net/publication/367619431_Degradation_of_Imidacloprid_from_Polluted_Soil_by_Rhizosphere_Microflora_Bacillus_safensis_Isolated_from_Sunflower_Helianthus_annuus

- Olguín, G. (2008). La comunicación entre bacterias y plantas. *Ciencia*, 59(2), 72-78. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/59_2/PDF/10-516-72-.pdf
- Oliveros, A. J., Macías, F. A., Fernández, C. C., Marín, D. y Molinillo, J. M. G. (2009). Exudados de la raíz y su relevancia actual en las interacciones alelopáticas. *Química Nova*, 32(1), 198-213. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000100035>
- Parra, F. (2017). *Rizofiltración de aguas de riego agrícola contaminadas por metales pesados en comunidades del municipio de Atlixco, Puebla* [Tesis de maestría]. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla <https://hdl.handle.net/20.500.12371/967>
- Peralta, M. R. y Volke, T. L. (2012). La defensa antioxidante en las plantas: una herramienta clave para la fitorremediación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 11(1), 75-88. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382012000100006&lng=es&tlang=es
- Rodríguez, S. C. (2011). *Potencial de las bacterias del suelo en la rizorremediación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH)* [Tesis doctoral]. Universidad de Granada. Facultad de Microbiología. <https://digidug.ugr.es/bitstream/handle/10481/19425/19957063.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Severiano, B. (2022). *Rizorremediación en suelo contaminado con petróleo crudo utilizando nopal verdura (*Opuntia spp.*)-Azospirillum spp.* [Tesis de licenciatura]. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/5b447718-80c1-4d62-8533-71f124165452>
- Singh, T. y Singh, D. K. (2019). Rhizospheric *microbacterium sp.* P27 showing potential of lindane degradation and plant growth promoting traits. *Current Microbiology*, 76(7), 888–895. <https://doi.org/10.1007/s00284-019-01703-x>
- Uribe, M., Peñuela, G. A. y Pino, N. J. (2022). *Megathyrsus maximus* and *Brachiaria decumbens* improve soil characteristics and select promising rhizobacteria during rhizoremediation of petroleum hydrocarbons. *Rhizosphere*, 22, 100517. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452219822000477>
- Zahid, M. S. B., Iqbal, A. y Arshad, M. (2015). Benzene degradation with bacterial strains isolated from rhizosphere of *Cannabis sativa* being irrigated with petroleum refinery wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 57(37), 17579-17584. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624031345?via%3Dihub>
- Zehfuss, G. H. (2008). La comunicación entre bacterias y plantas. *Ciencia-Academia Mexicana de Ciencias*, 59(2), 72-78. <https://biblat.unam.mx/es/revista/ciencia-academia-mexicana-de-ciencias/articulo/la-comunicacion-entre-bacterias-y-plantas>



Microplásticos en el aire y el mar: evidencia desde los puertos de México

Salvador Reynoso Cruces

Universidad Nacional Autónoma de México

reynoso@ciencias.unam.mx**Harry Álvarez Ospina**

Universidad Nacional Autónoma de México

harryalvarez@ciencias.unam.mx

Resumen

Los microplásticos, fragmentos plásticos de menos de cinco milímetros, son ya un contaminante omnipresente, ya que se encuentran en el aire que respiramos y en el mar que nos rodea. Un estudio en los puertos de Veracruz y Manzanillo confirma su presencia en ambas matrices, identificando nueve tipos de polímeros, con predominio de poliéster, polietileno y acrílico. Se comprobó además que las brisas marinas transportan los microplásticos del océano a la atmósfera, lo que favorece su dispersión a gran escala. Estos hallazgos ofrecen evidencia de la dinámica de microplásticos en costas mexicanas y subrayan la urgencia de implementar estrategias para reducir su propagación e impacto ambiental.

Palabras clave

Costas mexicanas, Veracruz, Manzanillo, polietileno, contaminación y marina.

Abstract

Microplastics, plastic fragments smaller than 5 millimeters, have become omnipresent pollutants: they are found in the air we breathe and in the seas around us. This study conducted in the ports of Veracruz and Manzanillo confirms their presence in both matrices, identifying nine types of polymers, with polyester, polyethylene, and acrylic as the most abundant. It also shows that sea breezes transport these particles from the ocean into the atmosphere, enhancing their large-scale dispersion. These findings provide evidence of microplastic dynamics along Mexican coasts and highlight the urgent need to implement strategies to curb their spread and environmental impact.

Keywords

Mexican coasts, Veracruz, Manzanillo, polyethylene, marine pollution.

APA: Reynoso, S. y Álvarez, H. (2025). Microplásticos en el aire y el mar: evidencia desde los puertos de México. *Azcatl*, 5, 39-42.

DOI: [10.24275/AZC2025B006](https://doi.org/10.24275/AZC2025B006)

Introducción

La producción mundial de plásticos superó las 410 millones de toneladas en 2024 (Plastics Europe, 2025). Esta enorme producción provoca su acumulación en el medio ambiente, donde con el tiempo se fragmentan debido a efectos físicos, químicos y biológicos, como la radiación solar, el viento, las olas y la actividad de microorganismos. Este proceso origina los llamados microplásticos (MP), partículas de menos de cinco milímetros (Grupo mixto de expertos sobre los aspectos científicos de la protección del medio marino, 2019). Por otro lado, existen microplásticos que se fabrican directamente de ese tamaño, como las microesferas que suelen ser ingredientes de algunos cosméticos o los pellets industriales (Andrade y Neal, 2009).

Lo sorprendente es que los MP ya no están presentes sólo en el mar, también se han encontrado flotando en el aire de ciudades y montañas remotas (Allen *et al.*, 2019; Brahney *et al.*, 2021). Incluso se han detectado en miel, leche materna y agua embotellada, lo que revela hasta qué punto forman parte de nuestro entorno cotidiano (Díaz *et al.*, 2020; Gálvez *et al.*, 2024).

Esto plantea una pregunta clave: ¿cómo viajan estas partículas plásticas de un lugar a otro? Desde hace tiempo se conoce el intercambio de material particulado entre el océano y la atmósfera, estudios recientes han demostrado que este intercambio también incluye a los MP (Reynoso *et al.*, 2025). El oleaje y el estallido de burbujas marinas pueden incorporar MP al aire y luego el viento transportarlos a grandes distancias antes de que regresen a la superficie terrestre o acuática con la lluvia (Allen *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2024).

En este contexto, los puertos marítimos se convierten en laboratorios naturales para estudiar el fenómeno, ya que son lugares donde se concentran plásticos, por la intensa actividad humana, y al mismo tiempo están expuestos a la interacción constante entre el aire y el mar. Este artículo presenta los resultados de un estudio realizado en dos puertos clave de México, donde fue posible observar de primera mano cómo los MP circulan entre el océano y la atmósfera.

El estudio en Veracruz y Manzanillo

La investigación se realizó entre 2023 y 2024 en dos de los puertos más importantes de México: Veracruz, en el Golfo de México, y Manzanillo, en el Pacífico, que juntos concentran la mayor parte del comercio marítimo nacional.

Para detectar y cuantificar los MP en el aire se utilizaron filtros de materiales no plásticos, capaces de retener partículas de tamaño micrométrico. Las sesiones de muestreo se realizaron dos veces al día, por la mañana (09:00 h-11:00 h) y por la tarde (15:00 h-17:00 h), utilizando filtros independientes en cada sesión. Este diseño permitió evaluar las variaciones asociadas a los cambios en la actividad humana y las condiciones meteorológicas a lo largo del día.

En el caso del agua de mar, se recolectaron 36 muestras por sitio, esto en un transecto de 9 km en línea recta desde la costa y hasta 9 m de profundidad. Las muestras se almacenaron en frascos de vidrio previamente limpios para evitar contaminación cruzada y permitir su posterior análisis en laboratorio.

Las partículas recuperadas se analizaron paso a paso: primero bajo el microscopio, clasificándolas por forma, color y tamaño, y después con micro-FTIR, una técnica que revela la composición química de cada plástico al compararlo con bases de datos de referencia (González *et al.*, 2021; Reynoso *et al.*, 2025).

Principales hallazgos

Se identificaron nueve tipos de plásticos en las muestras de aire y mar, entre los que se destacaron poliéster, acrílico y polietileno. El poliéster, presente en la ropa que usamos a diario, fue el polímero más abundante en ambos puertos. Su predominio no es casual: cada ciclo de lavado de la ropa libera millones de microfibras al ambiente, lo que explica por qué este polímero aparece en grandes cantidades a pesar de su densidad, superior a la de otros plásticos (Napper y Thompson, 2016; Hernández *et al.*, 2017). A nivel mundial, se estima que entre 200 000 y 500 000 toneladas de MP de origen textil ingresan cada año a los ecosistemas marinos (Agencia Europea del Me-

dio Ambiente, 2022). Las propiedades de cada plástico determinan su destino, por ejemplo, el poliéster tiene la capacidad de adsorber contaminantes, el polietileno flota y se dispersa a largas distancias y los acrílicos son muy resistentes a la degradación, lo que los hace persistentes en el ambiente.

En el aire, las concentraciones de MP fueron más altas por la mañana, especialmente en Veracruz, donde se registró un promedio de 3.9 MP m^{-3} , en comparación con 2.2 MP m^{-3} por la tarde. En Manzanillo, las concentraciones fueron ligeramente menores (3.2 MP m^{-3} en la mañana y 2.6 MP m^{-3} por la tarde), lo que refleja un patrón asociado con la brisa marina, que transporta partículas desde el mar hacia tierra.

En el agua de mar, la concentración promedio fue de 17 MP m^{-3} en la superficie, disminuyendo a 4 MP m^{-3} a los 9 m de profundidad. En el plano horizontal, las concentraciones descendieron de 12 MP m^{-3} , cerca de la costa, a 9 MP m^{-3} a 9 km mar adentro, lo que evidencia la influencia de las actividades portuarias y costeras.

La mayoría de las partículas correspondieron a fibras (70 %, aproximadamente), seguidas de fragmentos y películas con un claro predominio de poliéster, acrílicos y polietileno, materiales comunes en textiles y envases plásticos.

Finalmente, es importante mencionar que el oleaje y el estallido de burbujas marinas pueden inyectar MP a la atmósfera, pues el viento los transporta a grandes distancias antes de que regresen al océano o a la superficie continental con la lluvia o el polvo. Este ciclo de emisión y deposición es clave para entender la dispersión a escala global de estas partículas (Figura 1).

Conclusiones

El mar no es sólo un receptor de plásticos, sino que también los libera hacia el aire, donde el viento puede transportarlos a grandes distancias. En los puertos mexicanos estudiados encontramos que las brisas marinas impulsan este intercambio, convirtiéndolos en puntos críticos de dispersión.

Para frenar el problema es esencial vigilar los puertos y reducir las fuentes de plástico en las costas. Sólo así podremos limitar la huella invisible de los MP en nuestro ambiente.

Referencias

Agencia Europea del Medio Ambiente. (2022). *Microplastics from textiles: towards a circular economy for textiles in Europe*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/micro->

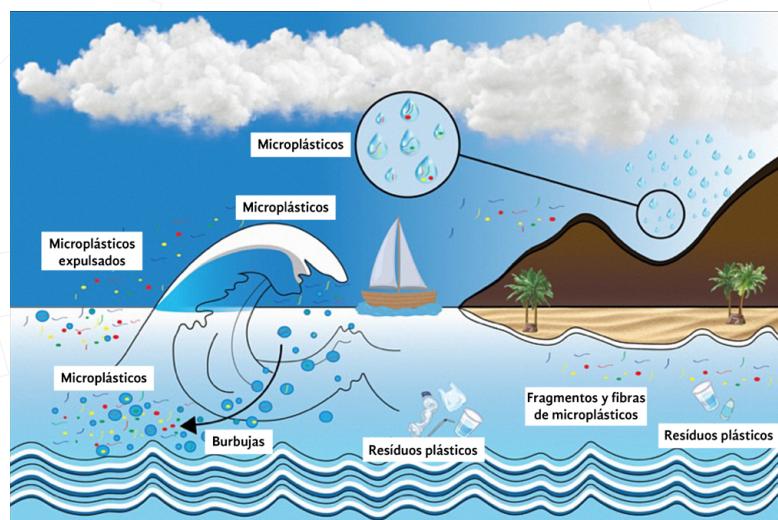


Figura 1: Representación gráfica del intercambio de MP entre las diferentes matrices ambientales.

- [plastics-from-textiles_towards-a-circular-economy-for-textiles-in-europe](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9600323/)
- Allen, D., Allen, S., Abbasi, S., Baker, A., Bergmann, M., Brahney, J., Butler, T., Duce, R. A., Eckhardt, S., Evangelou, N., Jickells, T., Kanakidou, M., Kershaw, P., Laj, P., Levermore, J., Li, D., Liss, P., Liu, K., Mahowald, N., ...Wright, S. (2022). Microplastics and nanoplastics in the marine-atmosphere environment. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(6), 393-405. <https://www.nature.com/articles/s43017-022-00292-x#citeas>
- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Durández, P., Simonneau, A., Binet, S. y Galop, D. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*, 12, 339-344. <https://www.nature.com/articles/s41561-019-0335-5#citeas>
- Andrade, A. L. y Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364(1526), 1977-1984. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2008.0304>
- Brahney, J., Mahowald, N., Prank, M. y Prather, K. A. (2021). Constraining the atmospheric limb of the plastic cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(16). <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2020719118>
- Díaz, M. F., Conesa, J. A. y Fullana, A. (2020). Microplastics in honey, beer, milk and refreshments in Ecuador as emerging contaminants. *Sustainability*, 12(14), 5514. <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/14/5514>
- Gálvez, V., Edo, C., González, M., Fernández, F., Leganés, F. y Rosal, R. (2024). Microplastics and non-natural cellulosic particles in Spanish bottled drinking water. *Scientific Reports*, 14(1), 11089. <https://www.nature.com/articles/s41598-024-62075-2>
- González, M., Edo, C., Aguilera, Á., Viúdez, D., Pulido, G., González, E., Osuna, S., De Diego, G., Leganés, F., Fernández, F. y Rosal, R. (2021). Occurrence and transport of microplastics sampled within and above the planetary boundary layer. *Science of the Total Environment*, 761. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720367449>
- Grupo mixto de expertos sobre los aspectos científicos de la protección del medio marino. (2019). *Guidelines for the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean*. <http://www.gesamp.org/publications/guidelines-for-the-monitoring-and-assessment-of-plastic-litter-in-the-ocean>
- Hernández, E., Nowack, B. y Mitrano, D. M. (2017). Polyester textiles as a source of microplastics from households: a mechanistic study to understand microfiber release during washing. *Environmental Science & Technology*, 51(12), 7036-7046. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b01750>
- Napper, I. E. y Thompson, R. C. (2016). Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: effects of fabric type and washing conditions. *Marine Pollution Bulletin*, 112(1-2), 39-45. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X16307639>
- Plastics Europe. (2025). *Plastics—the fast facts 2024*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>
- Reynoso, S., Edo, C., Rosal, R., Cervantes-Uc, J. M., Herrera-Kao, W., Olivos-Ortiz, A. y Álvarez-Ospina, H. (2025). Microplastics at the ocean-atmosphere interface in Mexican coastal areas of two major oceans. *Marine Environmental Research*, 210. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141113625003459>
- Yang, S., Brasseur, G., Walters, S., Lichtig, P. y Li, C. W. Y. (2025). Global atmospheric distribution of microplastics with evidence of low oceanic emissions. *npj Climatic and Atmospheric Science*, 8(81). <https://doi.org/10.1038/s41612-025-00914-3>



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA