

# Fuentes de emisión de las partículas suspendidas en el aire de la ciudad de La Paz, Baja California Sur, México

Lilia Alonso-Lozano \*, Alfredo S. Bermúdez-Contreras

Departamento Académico de Ingeniería en Pesquerías, Universidad Autónoma de Baja California Sur, La Paz, Baja California Sur, México

\* Autor de correspondencia: [l.alonso@uabcs.mx](mailto:l.alonso@uabcs.mx); Tel.: 52+6121767272

## Artículo de divulgación científica

Recibido: 28 de octubre de 2024

Aceptado: 18 de diciembre de 2024

Publicado: 26 de diciembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.297>

**Resumen:** Al año ocurren 6.7 millones de muertes prematuras relacionadas con la contaminación atmosférica mundialmente. Las partículas suspendidas son uno de los contaminantes de mayor interés en la salud, debido a su impacto por tamaño, composición y forma. El uso excesivo de combustibles fósiles para la generación de electricidad y la alta tasa vehicular en la ciudad de La Paz, Baja California Sur, cumple un rol fundamental en la emisión de las partículas. El presente estudio examinó la composición de las partículas suspendidas en el aire de la ciudad de La Paz y sus posibles fuentes de emisión. Desde cuatro sitios de muestreo de 3 m de altura y durante un año se colectaron partículas suspendidas en filtros de teflón utilizando una bomba de succión de aire. Mediante análisis de composición química se identificaron 14 elementos en 96 muestras, destacando el níquel y vanadio por sus altas concentraciones. Los análisis estadísticos indican que los elementos se emiten por tres grupos de fuentes: natural; autos, pinturas, huella de plomo; centrales eléctricas. Las concentraciones de los elementos se incrementan durante el invierno debido a la disminución de la temperatura, inversiones térmicas y vientos estacionales. Estos hallazgos destacan su importancia para la salud pública.

**Palabras clave:** composición química, metales, fuentes antrópicas, invierno

## Introducción

La contaminación atmosférica, tanto de exteriores como de interiores, se atribuye a la presencia de agentes físicos, químicos o biológicos que alteran las características de la atmósfera. Hoy en día es uno de los principales problemas ambientales y de salud el cual solía relacionarse con las grandes ciudades, aunque cada vez está más presente en las ciudades en crecimiento. La Organización Mundial de la Salud (OMS) indica que en el año 2019 el 99% de la población mundial vivió en ciudades que no respetaban las directrices sobre la calidad del aire. Durante ese mismo año, la OMS estimó 6.7 millones de muertes prematuras por cardiopatías isquémicas, accidentes cerebrovasculares, enfermedad obstructiva crónica, infecciones agudas de las vías respiratorias y cáncer de pulmón, relacionadas con la contaminación atmosférica. (OMS, 2022; 2024).

Las partículas suspendidas son un contaminante atmosférico de especial interés por su doble impacto en la salud, tienen un efecto tanto por el tamaño como por la composición. De acuerdo con su tamaño se clasifican como PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, las primeras son aquellas de diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros, que cuando son inhaladas quedan atrapadas en el tracto respiratorio superior. Las PM<sub>2.5</sub> poseen un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros y cuando son respiradas pueden penetrar hasta los bronquios, e incluso pueden ser introducidas al flujo sanguíneo. Respecto a la composición de las partículas, estas pueden contener material líquido o sólido constituido por diversos contaminantes como el hollín, polvo, humo, sulfatos, nitratos, ácidos, metales, entre otros, lo que también determina el posible impacto en la salud (USEPA, 2024).

La composición de las partículas está en función de la fuente que las emite, la cual puede ser un proceso natural, como un incendio forestal y/o un proceso antrópico. Por ejemplo, la generación de electricidad basada en combustibles fósiles como el combustóleo (residuo de la refinación del petróleo crudo), emite partículas que pueden contener metales pesados como el vanadio y níquel. De acuerdo con la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer el vanadio es posiblemente un carcinogénico en seres humanos (ATSDR, 2016a). Por su parte, la exposición a níquel puede ocasionar efectos graves como bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar y cáncer de los pulmones y los senos nasales (ATSDR, 2016b).

Además del impacto en la salud por el tamaño y composición de las partículas suspendidas, se suman efectos negativos en el ambiente como la lluvia ácida que a su vez altera el equilibrio químico del suelo y agua, pérdida de nutrientes,

daño a la vegetación, incremento en la disponibilidad de elementos tóxicos en suelo, agua y aire, daño en edificios históricos, afectación a la visibilidad y al turismo de paisaje, eutrofización, cambios en el balance radioactivo de energía relacionado con el cambio climático (Masters y Ela, 2008; Pérez-Vidal *et al.*, 2010).

Los inventarios de emisiones atmosféricas son instrumentos que contribuyen a identificar las fuentes de emisión y los contaminantes que son generados por estas en un área geográfica determinada. Con base en los inventarios realizados en la ciudad de La Paz, Baja California Sur (BCS), México, las centrales de generación de electricidad, así como los caminos pavimentados y no pavimentados son las principales fuentes de emisión de las partículas suspendidas en La Paz (Bermúdez *et al.*, 2017; SEMARNAT, 2018). A ello habría que añadir la elevada tasa de motorización que se ha estimado hasta en 1.27 vehículos por habitante (de las más altas a nivel mundial), lo que resulta en una fuente importante de emisión y resuspensión de partículas (IDOM, 2014).

Hasta hoy, solamente se cuenta con una investigación previa enfocada en conocer la composición de las partículas suspendidas en el aire de La Paz, lo que resalta la importancia de este trabajo. Murillo y colaboradores en el año 2011 identificaron azufre, mercurio, plomo y vanadio en las partículas suspendidas y concluyen que la salud de la población de La Paz pudiera estar comprometida por la presencia de estos metales en el aire. Conocer la composición de las partículas suspendidas contribuye a identificar las principales fuentes de emisión, determinar el efecto sanitario y ecológico de las partículas, así como su comportamiento en la atmósfera. Con base en esto, es posible generar las estrategias y medidas adecuadas para controlar y disminuir las emisiones de partículas. Así bien, partiendo de que no se cuenta con información reciente sobre la composición de las partículas suspendidas y dada su pertinencia para la salud de la población, en este trabajo se buscó examinar la composición de las partículas suspendidas en el aire de la ciudad de La Paz, BCS e identificar sus posibles fuentes de emisión.

## Desarrollo

El presente estudio se desarrolló en la ciudad de La Paz, cabecera y capital del estado de Baja California Sur (BCS) (Figura 1). En el entorno local predomina un ambiente árido principalmente, con temperaturas extremas durante el verano (24 – 37 °C) y el invierno (15 – 28 °C) (Herrera-Cervantes *et al.*, 2017). Después del municipio de Los Cabos, La Paz es el municipio más poblado del estado con 292 241 habitantes, de los cuales, poco más del 85% viven en la ciudad (INEGI, 2020). BCS se caracteriza por ser una región insular, donde se observan altos consumos de diferentes tipos de energéticos como la electricidad, gasolinas, combustóleo, diésel, entre otros, para el desarrollo de las actividades económicas propias del lugar (muchas de ellas ligadas al turismo) y el día a día de la población.

Baja California Sur es considerado una isla energéticamente ya que no está conectado al Sistema Eléctrico Nacional, por lo que la energía eléctrica que se demanda se produce localmente. El Sistema Interconectado de Baja California Sur cuenta con cinco centrales de generación de electricidad de la Comisión Federal de Electricidad, de las cuales, dos se ubican en la ciudad de La Paz y son las de mayor capacidad instalada (577.5 MW entre ambas): Central de Combustión Interna Baja California Sur (CCIBCS) y Central Termoeléctrica Punta Prieta (CTPP). Estas centrales utilizan mayoritariamente combustóleo y se encargan de suministrar energía eléctrica al municipio de La Paz y parte del consumo del municipio de Los Cabos.

Durante un año (marzo 2021 a abril 2022) se colectaron partículas suspendidas en cuatro sitios de la ciudad de La Paz (S1, S2, S3 y S4) (figura 1). Los sitios se seleccionaron con base en: i) los resultados de la investigación de Murillo y colaboradores (2011), dado que se empleó la misma técnica de colecta de las partículas suspendidas; ii) el área de estudio posee patrones de viento estacional, por lo que se buscó que los sitios fueran lo más representativos de la ciudad; iii) modelaciones de trayectoria de dispersión de contaminantes desarrollado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) y por el Bureau de Meteorología del gobierno de Australia. Las simulaciones se llevaron a cabo para conocer la las posibles trayectorias de las emisiones de las dos centrales de generación de electricidad CTPP y CCIBCS.

Para la colecta de las partículas suspendidas se instalaron sistemas colectores en techos de casas a una altura aproximada de 3 metros, cada sistema colector estaba conformado por una bomba de succión de aire marca Environmental Monitoring Systems (EMS). Mediante el uso de un temporizador automático, la bomba funcionaba 12 horas al día (de 6:00 a 12:00 y de 18:00 a 00:00 horas) y se conectaba mediante una manguera a un casete que en su

interior contenía un soporte de celulosa y un filtro de teflón de 2  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro y 47 mm de diámetro. Debido al tamaño del poro del filtro, las partículas colectadas son de interés para la salud. Cabe mencionar que cada filtro colectó una muestra durante aproximadamente 15 días tras lo cual el filtro en el casete era remplazado.

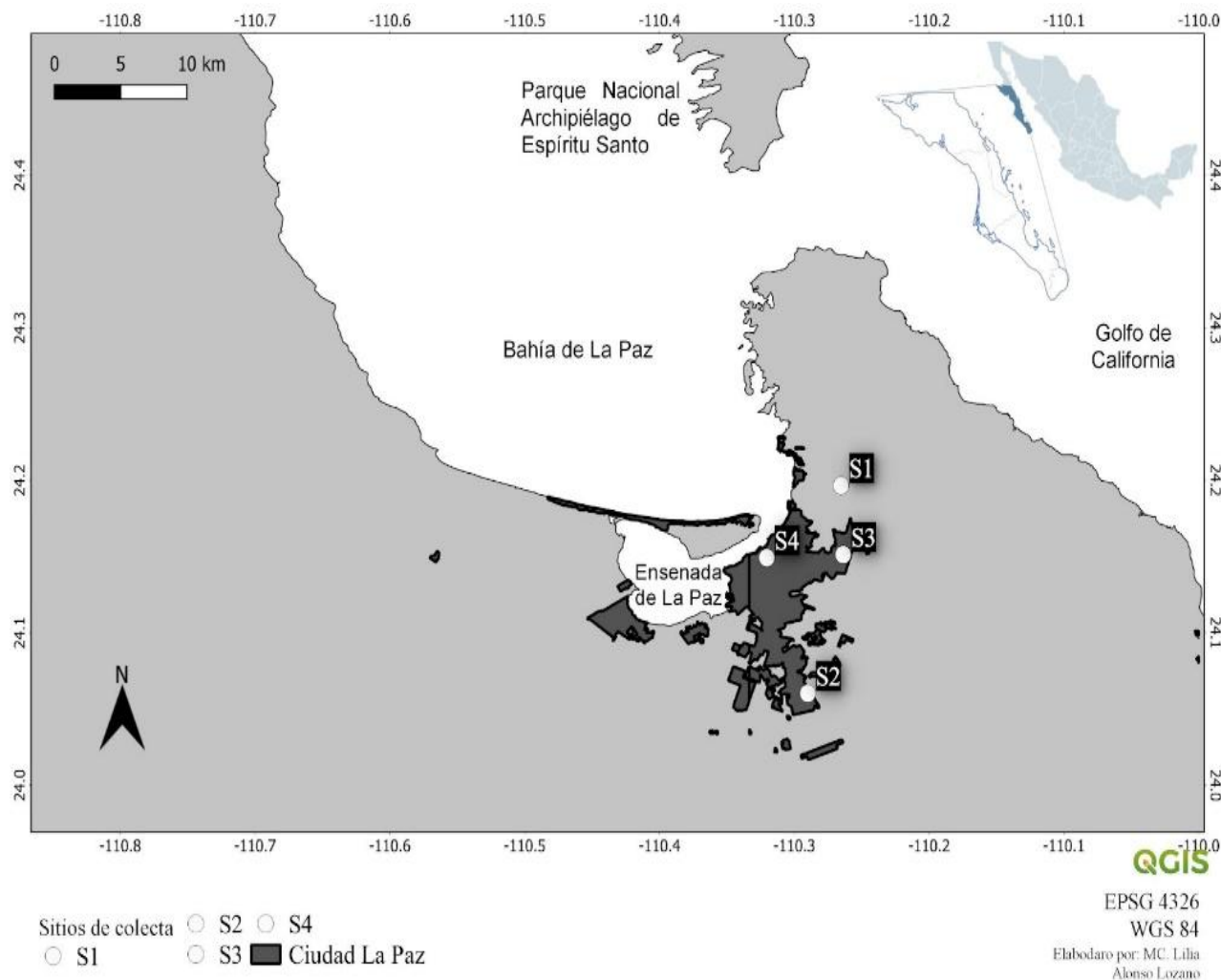


Figura 1. Área de estudio. Los círculos blancos indican los cuatro sitios de colecta de partículas (Fuente: Elaboración propia).

Una vez concluido el periodo de colecta de las partículas suspendidas, los filtros con las muestras se enviaron al Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) unidad Juriquilla, Querétaro, para un análisis de composición química mediante la técnica de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente. En este análisis se determinó la concentración de los siguientes elementos: Arsénico (As), Berilio (Be), Cadmio (Cd), Cerio (Ce), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn), Titanio (Ti) y Vanadio (V).

Las concentraciones media, mínima y máxima de los elementos analizados en las 96 muestras obtenidas se muestran en la **Tabla 1**. En México no hay normas que determinen el límite máximo de concentración de los elementos en mención, por lo que se tomó como línea base, es decir, las concentraciones esperadas, lo indicado en la carta minera geológica de 1999 para la zona local del Servicio Geológico Mexicano (SGM), así como el trabajo del geólogo Wedepohl (1995). Después del análisis de las muestras se encontró que la concentración promedio de Cd en las partículas suspendidas en el aire estuvo dos veces por arriba de los valores de la línea base. Por otro lado, la concentración promedio de Cu y Pb estuvo cuatro veces por arriba; la de Sn, seis veces; la de V, nueve veces y la de Ni 11 veces por arriba del valor de referencia.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de los elementos encontrados en las partículas suspendidas en el aire de La Paz.  
 Mín: Mínimo. Máx: Máximo. SGM: Servicio Geológico de México.

Elemento	Media (mg/kg)	Mín (mg/kg)	Máx (mg/kg)	Wedepohl (mg/kg)	SGM (mg/kg)
As	7.15	1.0	39.87	2.0	9.6
Be	0.7	0.1	2.9	3.1	0.9
Cd	1.4	0.0	4.9	0.1	0.7
Ce	9.5	1.0	47.3	65.7	-
Co	5.3	1.0	27.0	11.6	9.0
Cr	17.1	1.0	75.8	35.0	47.9
Cu	118.1	1.0	900.5	14.3	30.4
Fe	18 595.8	5705.5	50 539.2	30 890.0	25 806.3
Mn	416.6	81.7	924.4	527.0	384.0
Ni	103.6	6.2	658.7	18.6	9.0
Pb	62.2	17.8	58.2	17.0	17.0
Sn	6.0	0.5	20.7	2.5	0.9
Ti	769.8	190.7	2181.1	3117.0	-
V	454.4	19.9	3256.3	53.0	-

#### *Fuentes de emisión de las partículas suspendidas*

Como se explicó, las partículas suspendidas suelen contener una mezcla amplia de elementos y compuestos que se relaciona con la fuente que las emite, el combustible empleado (en procesos de combustión) y aspectos ajenos a la combustión tales como el desgaste de frenos y neumáticos de los automóviles.

Para determinar las posibles fuentes de emisión de las partículas suspendidas, primero se obtuvo un índice conocido como Factor de Enriquecimiento (FE). El FE toma en cuenta la composición de la geología local del sedimento e indica si los elementos están enriquecidos por las actividades antrópicas (por ejemplo, la generación de electricidad, uso de automóviles, entre otras), como fue el caso del Cu, Ni, Pb, Sn y V presente en las partículas. El Fe también indica si se trata de depósitos minerales como el As, Be, Ce, Cr, Fe, Mn y Ti, característicos de los sedimentos de la geología local y que, por acción del viento, se adhieren en las partículas suspendidas.

Por otra parte, se aplicó un análisis estadístico de factores en el programa Statistica. El análisis de factores agrupa los elementos según su correlación, es decir, su grado de relación, interpretándose como fuentes de emisión en común aquellos que tuvieran como mínimo 70% de correlación. Así bien, a partir de la composición y concentración conocida de los elementos presentes en las partículas suspendidas en el aire en la ciudad de La Paz se identificaron tres fuentes de emisión:

1. Fuente natural: los elementos As, Be, Ce, Co, Cr, Fe, Mn y Ti son de origen natural. Su concentración en las partículas suspendidas en el aire depende de procesos como el desgaste y desintegración de las rocas locales.
2. Fuente antrópica: los elementos Cd, Cu, Pb y Sn son generados por las pinturas amarillas para asfalto; emisiones del tránsito vehicular y/o huellas de Pb de cuando formaba parte de la gasolina en décadas pasadas. Es importante recalcar que la ciudad de La Paz tiene una elevada tasa de motorización, una de las más altas incluso a nivel mundial.
3. Fuente antrópica: el V y el Ni son emitidos por las centrales de generación de electricidad. Con base en los inventarios de emisiones las centrales eléctricas ubicadas en La Paz son una de las dos principales fuentes de contaminación atmosférica; ambas funcionan a base de diésel, combustible intermedio 15 (una mezcla de 15 % diésel y 85 % combustóleo) y principalmente con combustóleo, el cual se caracteriza por un alto contenido en vanadio y níquel.

## Variaciones en las concentraciones de los elementos presentes en las partículas a lo largo del año

Otro interés en este estudio fue conocer si la concentración de los elementos presentes en las partículas suspendidas se mantenía constante a lo largo del año, o si había diferencias entre las estaciones del año. Estadísticamente, las concentraciones de los elementos Ni y V permanecen relativamente estables a lo largo del año, a diferencia del resto de los elementos cuya concentración se incrementa considerablemente durante el invierno. El incremento en la concentración durante el invierno se explica con el cambio en la dirección del viento (proveniente del noroeste y noreste durante la estación), lo que favorece que las partículas se dispersen en dirección a la ciudad. Por otro lado, el descenso en la temperatura durante el invierno impulsa las inversiones térmicas, esto provoca un efecto similar a colocar una tapa en una olla e impide que las partículas puedan ascender en la atmósfera y dispersarse.

Finalmente, la geología es otro factor importante. La Paz se encuentra rodeada por relieves de altura media y cerros de diferentes alturas (200 metros sobre el nivel medio del mar en promedio) que condicionan el ascenso del viento, limitando la circulación regional del viento y la dispersión de los contaminantes.

### ¿Qué se recomienda?

Es importante y urgente focalizar propuestas de mitigación de emisiones de contaminantes atmosféricos, que disminuyan el riesgo ecológico por la presencia de partículas suspendidas y metales pesados en el aire, así como el posible impacto a la salud por exposición a largo plazo a estos contaminantes. El uso de precipitadores electrostáticos para la remoción de las partículas emitidas por las unidades generadoras de electricidad disminuiría los niveles de contaminación por partículas suspendidas y con ello, los elementos que las componen. Por otro lado, el estado de Baja California Sur tiene un gran potencial para la generación de energía eléctrica a partir de energía renovable, principalmente solar y eólica, que pudieran incrementar su aportación a la matriz energética del Sistema Interconectado Baja California Sur.

Igual de importante es sensibilizar a la población de La Paz sobre la problemática de la contaminación atmosférica en la ciudad y sus repercusiones en la salud y con ello, llevar a cabo acciones de uso responsable de los recursos energéticos como la energía eléctrica o la gasolina (en relación a la elevada tasa vehicular).

## Conclusiones

Las partículas suspendidas en el aire de la ciudad de La Paz contienen metales pesados. La fuente de origen de estas partículas es variada. Para el caso de los elementos As, Be, Ce, Co, Cr, Fe, Mn y Ti presentes en las partículas, su origen es principalmente natural. Cd, Cu, Pb y Sn son emitidos por pinturas viales, el tránsito vehicular y/o huellas de Pb de la gasolina de décadas anteriores. Ni y V son emitidos por las centrales de generación de electricidad.

Las concentraciones de los elementos presentes en las partículas se incrementan durante el invierno por cambios ambientales como la disminución en la temperatura, la presencia de inversiones térmicas y el cambio en la dirección del viento.

Al ser un tema de salud pública, seguridad, justicia social y ambiental, es necesario continuar realizando este tipo de monitoreos para contar con evidencia suficiente que permita establecer relaciones de causalidad entre los contaminantes y la salud de la población de La Paz. Igual de importante es generar material de divulgación con el fin de empoderar a la población y exigir propuestas de mitigación de contaminantes atmosféricos.

## Bibliografía

- ATSDR. (2016a). *Vanadio*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts58.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts58.html)
- ATSDR. (2016b). *Níquel*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs15.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs15.html)
- Bermúdez A.S., Ivanova A. y Martínez J.A. (2017). Polluting emissions in the City of La Paz, Mexico: emissions inventory and monitoring data. *Current Urban Studies*, 5, 54-67, <https://doi.org/10.4236/cus.2017.51004>
- Herrera-Cervantes H., Beier E. y Balart E. (2017). Red de Monitoreo Ambiental para el estudio de la variabilidad Océano-Atmósfera en la Bahía de La Paz, B.C.S, México. *Recursos Naturales y Sociedad*, 3(2), 32-44. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2017.03.03.02.0003>

- IDOM. (2014). *Plan Integral Movilidad Urbana Sustentable de la Ciudad de La Paz, Baja California Sur*. Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles. Ingeniería y Dirección de Obras y Montaje.
- INEGI. (2020). *Censo de población y Vivienda 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Tabulados>
- Masters G. y Ela W. (2008). *Introducción a la ingeniería medioambiental*. Madrid, España, 717 pp.
- OMS (2022). *Contaminación del aire ambiente exterior*. Organización Mundial de la Salud. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health#:~:text=Los%20efectos%20combinados%20de%20la,2%20millones%20de%20muertes%20prematuras.](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health#:~:text=Los%20efectos%20combinados%20de%20la,2%20millones%20de%20muertes%20prematuras.)
- OMS (2024). *Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud*. Organización Mundial de la Salud. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health#:~:text=La%20OMS%20estima%20que%20en, infecciones%20agudas%20de%20las%20v%C3%ADAs](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health#:~:text=La%20OMS%20estima%20que%20en, infecciones%20agudas%20de%20las%20v%C3%ADAs)
- Pérez-Vidal, H., Lunagómez-Rocha, M. A., & Acosta-Pérez, L. (2010). Análisis de partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM10), en Cunduacán, Tabasco. *Universidad y ciencia*, 26(2), 151-162. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792010000200003&lng=es&nrm=iso.](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792010000200003&lng=es&nrm=iso)
- SGM (1999). *Banco de datos del Servicio Geológico Mexicano*. Servicio Geológico Mexicano. <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGovMx>
- USEPA (2024). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. United States Environmental Protection Agency. <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles#effects>
- Wedepohl, K. H. (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica et cosmochimica Acta*, 59(7), 1217-1232.