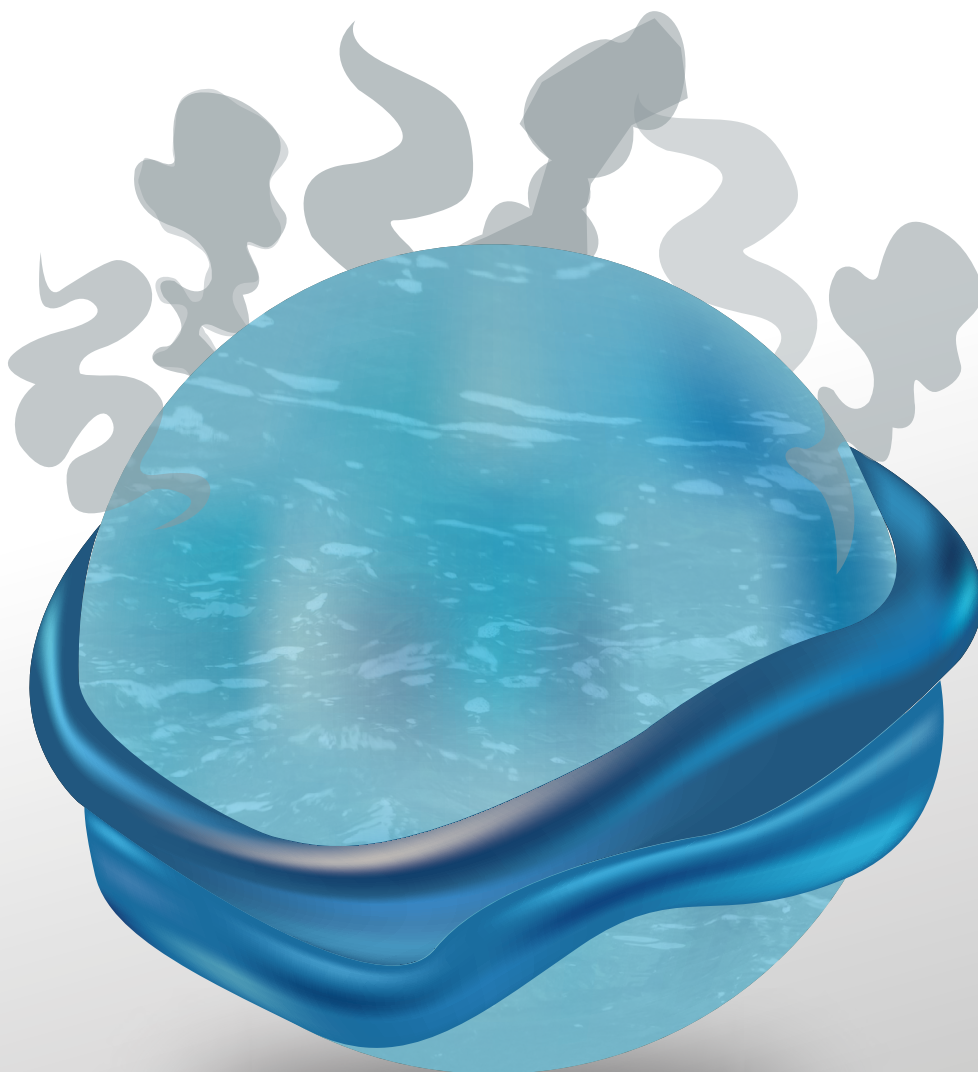


Una primera mirada a la **presencia de contaminantes** orgánicos y microbiológicos en la atmósfera cercana a **ríos contaminados**



Dra. Paula Monserrat Crespo Barrera
Dra. Zenaída Carolina Leyva Inzunza
Dr. Raúl Jacobo Delgado Macuñ
Dr. Guillermo Manuel Horta Valerdi
M.C. José María Cunill Flores
Dr. José Carlos Mendoza Hernández
Dr. Amado Enrique Navarro Frómata



PUEBLA
Un gobierno presente



Secretaría
de Educación

CONCYTEP
Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado
de Puebla

Una primera mirada a la **presencia de contaminantes** orgánicos y microbiológicos en la atmósfera cercana a **ríos contaminados**

Dra. Paula Monserrat Crespo Barrera
Dra. Zenaida Carolina Leyva Inzunza
Dr. Raúl Jacobo Delgado Macuil
Dr. Guillermo Manuel Horta Valerdi
M.C. José María Cunill Flores
Dr. José Carlos Mendoza Hernández
Dr. Amado Enrique Navarro Frómeta

Sergio Salomón Céspedes Peregrina

Gobernador Constitucional del Estado de Puebla

Javier Aquino Limón

Secretario de Gobernación del Estado de Puebla

Gabriela Bonilla Parada

Presidenta del Sistema Estatal para el
Desarrollo Integral de la Familia

María Isabel Merlo Talavera

Secretaría de Educación del Estado de Puebla

Eduardo Castillo López

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

María Belinda Aguilar Díaz

Presidenta del Tribunal Superior de Justicia del Estado de Puebla

Victoriano Gabriel Covarrubias Salvatori

Director General del Consejo de Ciencia y Tecnología
del Estado de Puebla

Luis Gerardo Aguirre Rodríguez

Responsable del Área de Publicaciones

Jesús Iglesias Castelán

Eduardo Jáuregui Sainz de Rozas

María Ixel Hernández Hernández

Corrección de estilo

Karla Rodríguez Rosas

Diseño editorial y de portada

Primera edición, México, 2023

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

ISBN: 978-607-8901-88-3

CÓDIGO IDENTIFICADOR CONCYTEP: C-L-2023-10-114

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

Paula Monserrat Crespo Barrera

Zenaida Carolina Leyva Inzunza

Raúl Jacobo Delgado Macuill

Guillermo Manuel Horta Valerdi

José María Cunill Flores

José Carlos Mendoza Hernández

Amado Enrique Navarro Frómata

Autoras y Autores

Una primera mirada a la **presencia de contaminantes** orgánicos y microbiológicos en la atmósfera cercana a **ríos contaminados**



PUEBLA
Un gobierno *presente*



Secretaría
de Educación

CONCYTEP
Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado
de Puebla

Autores:

Dra. Paula Monserrat Crespo Barrera,
Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros,
moncbarrera@gmail.com

Dra. Zenaida Carolina Leyva Inzunza,
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y
Tecnología Avanzada Unidad Legaria,
zleyva@ipn.mx

Dr. Raúl Jacobo Delgado Macuil,
Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada del
Instituto Politécnico Nacional,
rdelgadam@ipn.mx

Dr. Guillermo Manuel Horta Valerdi,
Universidad Politécnica Metropolitana de Puebla,
gmohova@gmail.com

M.C. José María Cunill Flores,
Universidad Politécnica Metropolitana de Puebla,
Red Iberoamericana de Tratamiento de Efluentes con Microalgas,
jomacunill@gmail.com

Dr. José Carlos Mendoza Hernández,
Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
josecarlos.mendoza@correo.buap.mx

Dr. Amado Enrique Navarro Frómeta*,
Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros,
navarro4899@gmail.com

***Autor para correspondencia**

Contenido

OBJETIVOS DEL PRESENTE MATERIAL	1
LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y LOS RIESGOS A LA SALUD HUMANA.....	3
LOS CONTAMINANTES EMERGENTES.....	14
LA IMPORTANCIA DE LA DETECCIÓN DE LOS CONTAMINANTES Y EL PAPEL DE LA IMPLEMENTACIÓN DE BIOSENSORES	27
LOS MICROORGANISMOS EN LOS BIOAEROSOL Y LA IMPORTANCIA DE SU ESTUDIO.....	39
LAS MICROALGAS EN LOS BIOAEROSOL ATMOSFÉRICOS. REPERCUSIÓN EN LA SALUD	45
ESTUDIO DEL AIRE Y LOS BIOAEROSOL EN LAS INMEDIACIONES DE RÍOS CONTAMINADOS	54
APÉNDICE A. METODOLOGÍA PARA LA EXTRACCIÓN DE LAS MUESTRAS DE AIRE Y DE LOS RÍOS ANALIZADAS EN ESTE TRABAJO.....	83

Objetivos del presente material

El presente material tiene por objetivo mostrar, en primer lugar, los riesgos de la contaminación atmosférica para la salud humana, en específico la del material particulado y las sustancias químicas y microorganismos que transporta. Asimismo, busca brindar evidencias de la presencia de los contaminantes de preocupación emergente en las aguas residuales domésticas e industriales y, finalmente, cómo esta presencia se manifiesta también en la atmósfera cercana a los ríos contaminados. Lo anterior intenta ampliar la cultura ciudadana sobre la contaminación, de manera que se propongan y lleven a cabo políticas públicas por las distintas instancias gubernamentales y ciudadanas, con una participación consciente de la población para mitigar, atenuar y en última instancia solucionar los problemas que de ella se derivan.

Se recalca que los resultados obtenidos representan solamente una primera aproximación al estudio del problema abordado. Una evaluación más profunda requiere, por supuesto, de una mayor cantidad de muestreos en tiempo y a distintas distancias de los ríos para la determinación de las variaciones espaciotemporales de las concentraciones de contaminantes.

Para facilitar que el público lector pueda enfocarse en los aspectos de su interés, el material se presenta en secciones que abordan los distintos temas planteados en el párrafo anterior. En cada una se indica, sin carácter exhaustivo, alguna bibliografía que puede ser útil para profundizar en el tema.

Los resultados que aquí se presentan se obtuvieron gracias al apoyo del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla, entidad que financió todos los trabajos experimentales, incluyendo el equipo *nanodrop* y el muestreador de alto volumen.

La contaminación atmosférica y los riesgos a la salud humana

Cuando vemos que un vehículo está tirando mucho humo negro por el tubo de escape, todos comprendemos que algo no funciona bien en su motor y si nos pasa cerca, nos molesta el olor que sentimos. Sin embargo, ya una vez que pasa, respiramos aliviados, sin darnos cuenta de que aún en el aire flotan muchas partículas y gases que seguimos respirando. Igualmente usamos tantas cosas con sustancias químicas todos los días que en el aire también las encontramos, unidas a diferentes partículas como el polvo, el polen y hasta pequeños pedacitos de plástico, invisibles normalmente. Todas estas cosas que están en el aire pueden pasar a nuestros pulmones y ocasionarnos problemas de salud. Todo esto se resume con el nombre de contaminación atmosférica. Esta contaminación es la que más problemas de salud y perjuicios económicos le trae a México y por ello es importante que aprendas sobre ella.

Todos los días se escucha la palabra contaminación y se perciben de distintas maneras sus efectos. Resulta pertinente exponer la legislación al respecto. La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en su versión vigente con la última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 11 de abril de 2022 (Diputados, 2022), define como contaminante a “Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural”. Así, establece claramente la definición de contaminación como “La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico” (Diputados, 2022), siendo a su vez definido el desequilibrio ecológico como “La alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos” (Diputados, 2022). A partir de lo anterior, se pueden establecer distintos tipos de contaminación: visual, sonora y lumínica, además de otras más conocidas, por ejemplo, la contaminación del agua. En síntesis, toda sustancia o forma de energía que al introducirse en el ambiente

afecte la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás seres vivos, alterando el normal equilibrio ecológico en los ecosistemas, ocasiona contaminación. Una implicación directa de esto son los riesgos a la salud humana y de los ecosistemas derivados de la contaminación.

Sin embargo, ¿cuál es la contaminación que más afecta a México desde los puntos de vista de la salud y económico? Según los datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022) para la carga global de enfermedades en el año 2019, por causas atribuibles a la contaminación atmosférica, para ambos sexos, se tienen las siguientes cifras de muertes anuales por cada 100,000 habitantes: total - 43; infecciones del sistema respiratorio inferior - 6; cáncer de tráquea, bronquios y pulmones - 1; isquemias cardíacas - 25; accidente cerebrovascular - 6; enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) - 5. Por otro lado, según los datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (INEGI) en sus Cuentas Económicas y Ecológicas de México 2021 (INEGI, 2022), los costos ambientales por emisiones al aire ascendieron a 660,333.8 millones de pesos, lo que equivale a 2.6 % del Producto Interno Bruto, siendo el componente de mayor incidencia en los costos ambientales.

Cápsula # 1

La contaminación atmosférica ocasiona, según datos de 2019, 43 muertes anuales por cada 100,000 habitantes.

La mayor incidencia en los costos ambientales se debe a las emisiones a la atmósfera, que en 2021 ascendió a 660,333.8 millones de pesos, equivalente a 2.6 % del Producto Interno Bruto.

De acuerdo con la OMS, 2023, la contaminación del aire (tanto la de exteriores como la de interiores) es la presencia de agentes químicos, físicos o biológicos que alteran las características naturales de la atmósfera. Se estima que casi toda la población mundial (99 %) respira un aire que supera los límites recomendados por la OMS. De acuerdo con la OMS y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA por sus siglas en inglés), los contaminantes más preocupantes para la salud pública (también denominados contaminantes criterio) son las partículas en suspensión o material particulado (MP en español o *PM* en inglés), el monóxido de carbono, el ozono, el dióxido de nitrógeno, el plomo y el dióxido de azufre. La contaminación del aire exterior y de interiores provoca enfermedades respiratorias y de otros tipos; además, es una de las prin-

cipales causas de morbilidad y mortalidad (OMS, 2023; USEPA, 2022a, 2022b). Asimismo, el MP ocasiona otros problemas ambientales, como la afectación a la visibilidad, acentuación de los efectos de las lluvias ácidas, incrementa las pérdidas de nutrientes en los suelos, afecta estatuas y obras arqueológicas, entre otros (USEPA, 2022a). Este trabajo se refiere específicamente a las consecuencias del MP y los contaminantes asociados con este material. Las personas interesadas en conocer más sobre otros contaminantes pueden encontrar información adicional en las referencias citadas. Para el monitoreo de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla se cuenta con la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA) que comprende 5 estaciones provistas de dispositivos para medir los niveles de distintos contaminantes. Se emiten reportes de calidad del aire que pueden ser consultados en el sitio electrónico de la REMA, https://calidaddelaire.puebla.gob.mx/views/principal_monitoreo.php.

El MP (USEPA, 2022c) comprende una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire. Tienen múltiple variedad de tamaño y formas. Generalmente, para los fines de su seguimiento, utilizando diversos tipos de filtros, se agrupan de acuerdo con su tamaño y esto se indica en la denominación. Así, cuando se señala *PM10*, se refiere al MP con un diámetro efectivo inferior a $10\text{ }\mu\text{m}$ por sus siglas en inglés (*particulate matter*). Atendiendo a lo anterior, se tienen como grupos principales a *PM10* y *PM2.5* (Figura 1). En la actualidad se presta ya atención a *PM1.0* y se dispone de equipos para su monitoreo y se evalúan sus efectos sobre la salud humana (G. Wang *et al.*, 2021).

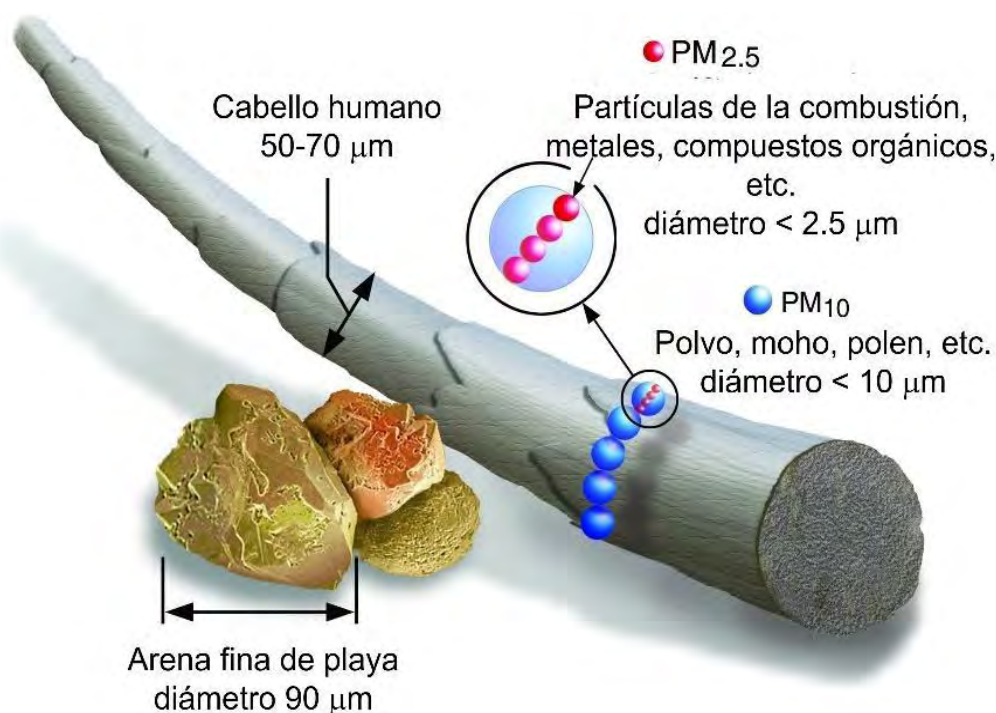
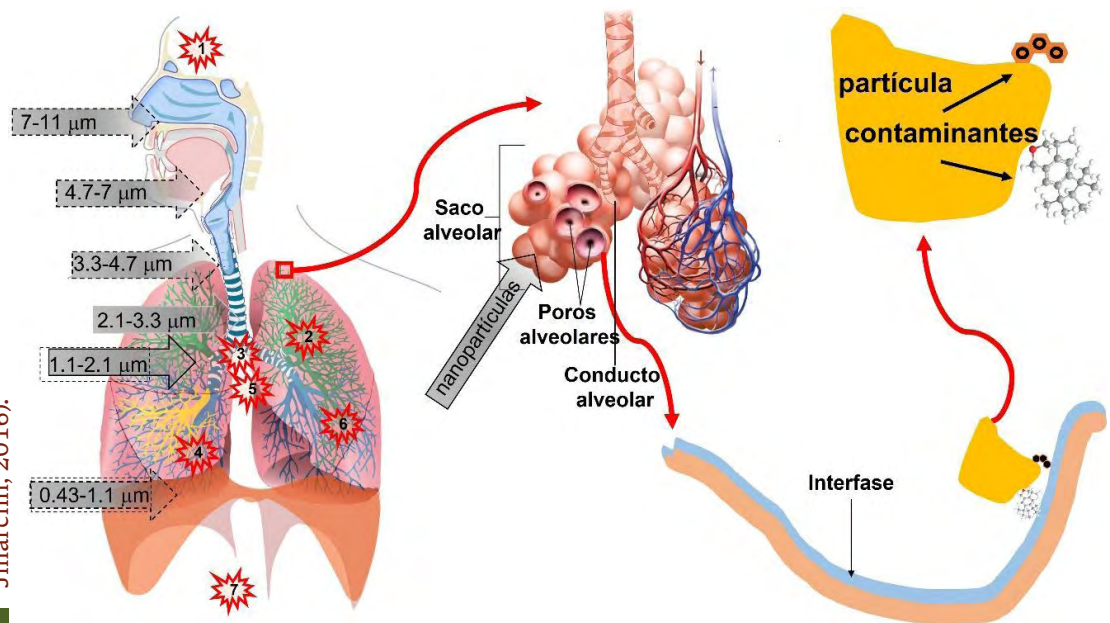


Figura 1. Tamaño comparativo del *PM10* y *PM2.5* con un cabello humano (adaptada de USEPA, 2022c).

Las características aerodinámicas de las partículas, en primer lugar, su tamaño, son determinantes en su penetración al sistema respiratorio humano. En la Figura 2 se muestran los tamaños de MP que inciden en diferentes partes del sistema respiratorio (Kim *et al.*, 2015). La modelación del depósito de partículas muestra que en general las partículas gruesas ($> 2.5 \mu\text{m}$) se depositan principalmente en la región traqueobronquial por impactación, mientras que las partículas finas ($< 2.5 \mu\text{m}$) lo hacen en la región pulmonar por sedimentación y difusión, influyendo además la densidad de estas (Deng *et al.*, 2019). Debe mencionarse que las partículas más pequeñas, llegando a las nanopartículas, pueden penetrar incluso en el torrente sanguíneo al nivel alveolar.

Figura 2. El MP, el sistema respiratorio y algunos efectos sobre la salud. Los números se corresponden con los problemas de salud descritos en el texto. (Elaboración propia utilizando las figuras de internet OpenStax College, 2018 y Jmarchn, 2016).



Los valores permisibles para PM_{10} y $PM_{2.5}$ se encuentran regulados por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021 (Diario Oficial de la Federación, DOF, 2021). Los valores se muestran en la Tabla 1. En la Tabla 2 se presentan los valores establecidos por la OMS (2021), además, se plantean objetivos provisionales, considerando una elevada contaminación de partida, para lograr una reducción gradual de los valores del MP. Mayores detalles se pueden consultar en la referencia indicada para esta tabla.

Tabla 1. Cumplimiento gradual para los valores límite de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente (DOF, 2021).

Contaminante	Concentración	Año 1 ^a	Año 3 ^a	Año 5 ^a
PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 h	70	60	50
	Anual	36	28	20
$PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 h	41	33	25
	Anual	10	10	10

^a Los años se contarán a partir de la entrada en vigor de esta Norma.

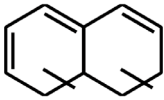
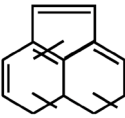
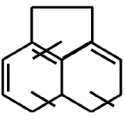
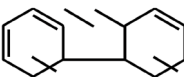
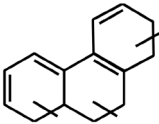
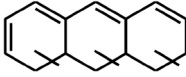
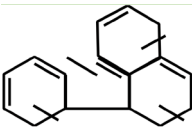
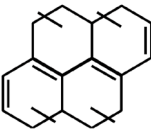
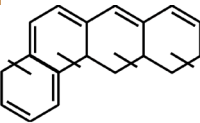
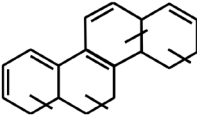
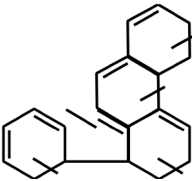
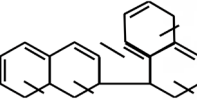
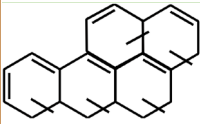
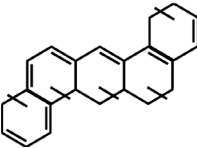
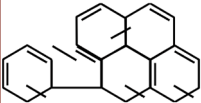
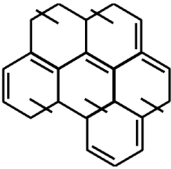
Tabla 2. Valores de MP para los distintos objetivos provisionales (OMS, 2021).

Contaminante	Concentración	LCA	OP 1 ^a	OP 2 ^a	OP 3 ^a	OP 4 ^a
PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 h	45	150	100	75	50
	Anual	15	70	50	30	20
$PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 h	15	75	50	37.5	25
	Anual	5	35	25	15	10

Notas: LCA – lineamiento de calidad del aire, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, OP – objetivos provisionales

En el MP se presentan diversos contaminantes derivados de los fenómenos fisicoquímicos que ocurren cuando las partículas se encuentran en la atmósfera como parte de los aerosoles secundarios. Estos contaminantes tienen su origen en fenómenos naturales como las erupciones volcánicas y los incendios forestales no provocados, y también se derivan de las actividades antrópicas, tales como el uso de combustibles fósiles en fuentes fijas (instalaciones industriales) y móviles (transporte), las quemas intencionales de biomasa y actividades agrícolas, entre otras. Entre los contaminantes orgánicos presentes en el MP, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son objeto de monitoreo y estudio sistemático, pues se ha comprobado el efecto cancerígeno de algunos de ellos y también otros efectos no carcinogénicos que involucran los sistemas respiratorio, gastrointestinal y dérmico en dependencia de la dosis en la exposición (Mallah *et al.*, 2022). En la Tabla 3 se muestran las estructuras de los HAP prioritarios.

Tabla 3. Los HAP prioritarios.

Nº de anillos	Estructura, nombre (abreviatura)				
2	 Naftaleno (NAP, Nap)				
3	 Acenaftileno (Acy)	 Acenafteno (Ace)	 Fluoreno (Flu)	 Fenantreno (Phe)	 Antraceno (Ant)
4	 Fluoranteno (Flt)	 Pireno (Pyr)	 Benzo(a) Antraceno (BaA)	 Criseno (Chr)	
5	 Benzo(b) Fluoranteno (BbF)	 Benzo(K) Fluoranteno (BkF)	 Benzo(a)pireno (BaP)	 Dibenzo(ah) Antraceno (DahA)	
6	 Indeno (1,2,3,c,d)pireno (IcdP)	 Benzo(g,h,i) Perileno (BghiP)			

En estudios realizados por integrantes del colectivo de autores, en el material *PM10* colectado en 3 estaciones de la REMA durante los años 2008 y 2009, se cuantificaron estos hidrocarburos (Figura 3). Se muestran para comparación las medianas de los valores para la Ciudad de México (CDMX), reportados en el año 2002 (Amador-Muñoz *et al.*, 2013). Las abreviaturas están referidas en la Tabla 3, excepto: BeP – Benzo[e]Pireno; Per – Perileno; Cor – Coroneno; BaPE – Benzo[a]Perileno. BbkF = BbF+BkF.

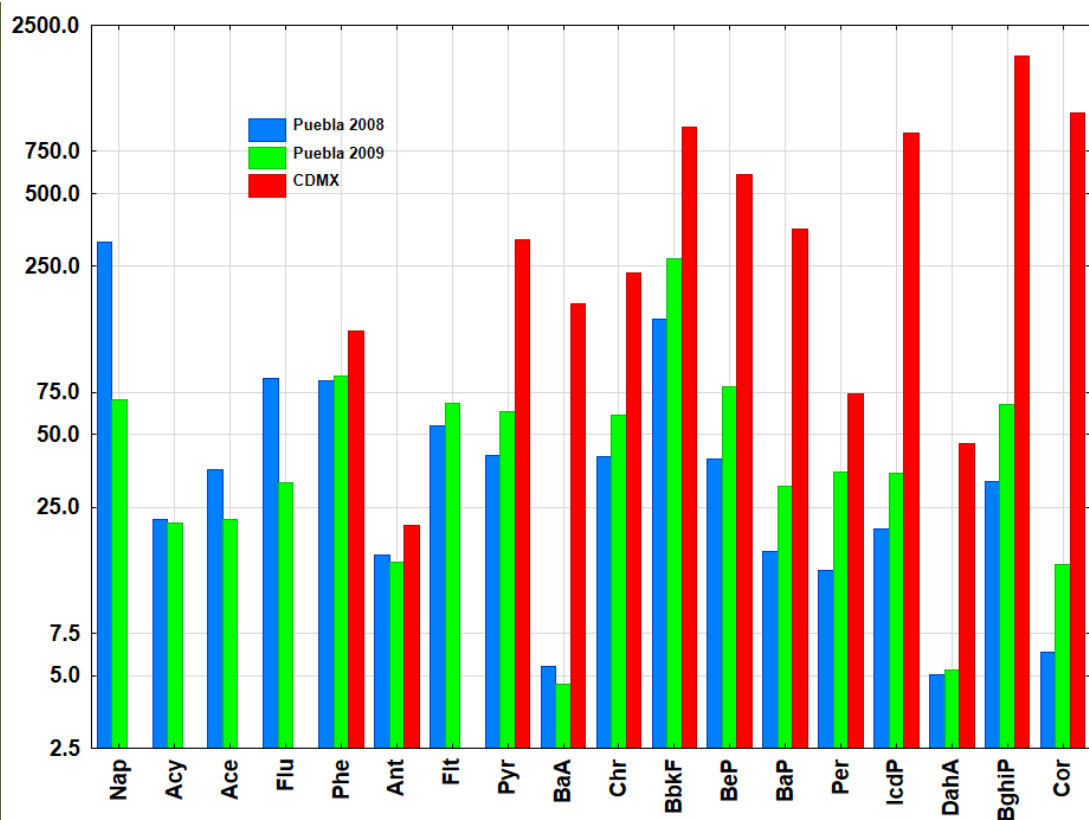


Figura 3. Medianas de las concentraciones de HAP en Puebla, años 2008-2009 y las de la CDMX (Amador-Muñoz *et al.*, 2013).

Además de los HAP, en el MP se encuentran otros contaminantes orgánicos como productos que se utilizan diariamente en el hogar, la industria y las actividades agropecuarias (Quintana-Belmares *et al.*, 2018; Sánchez-Piñero *et al.*, 2022). Estos compuestos pueden comportarse como disruptores endocrinos, carcinógenos y presentar otros efectos perjudiciales para la salud humana y de los seres vivos. Sobre esto se abundará más adelante. Todos los contaminantes que acompañan al MP, después de penetrar en el aparato respiratorio, entran en contacto directo con las interfases y células de distinto tipo en las superficies del aparato respiratorio (Figura 2), entre las cuales se encuentra el material tensoactivo o surfactante pulmonar en los alvéolos. Este surfactante pulmonar, presente en los mamíferos, es una mezcla de lípidos y proteínas cuya función precisamente es disminuir la tensión superficial y evitar el colapso total o parcial del pulmón. En estas interacciones, los contaminantes pueden pasar al interior de los órganos del sistema respiratorio (F. Wang *et al.*, 2020).

Entre los efectos negativos para la salud humana, algunos de los cuales se localizan en el aparato respiratorio (Figura 2) y que se derivan de la exposición al MP y los contaminantes de todo tipo presentes en él, se encuentran (NASA, Agencia Espacial Norteamericana por sus siglas en inglés, 2023; Sánchez-Piñero *et al.*, 2022; Sanità di Toppi *et al.*, 2020):

1. Accidente cerebrovascular. Una reducción del flujo de sangre al cerebro que puede ser fatal si no se atiende de inmediato.
2. La EPOC es una enfermedad pulmonar inflamatoria crónica y progresiva que provoca la obstrucción del flujo de aire de los pulmones. Los síntomas incluyen dificultad para respirar, tos, producción de moco (esputo) y sibilancias.
3. Afectación del flujo de sangre al corazón, lo que puede aumentar la probabilidad de accidentes cerebrovasculares y de infartos de miocardio.
4. Infecciones de las vías respiratorias inferiores, como neumonía, algunos tipos de gripe, bronquitis, y el SARS-CoV-2.
5. Infarto de miocardio cuando parte o la totalidad del músculo cardíaco queda sin oxígeno.
6. Cáncer de pulmón, una de las formas más letales del cáncer.
7. Otros efectos en el organismo, como problemas en la gestación (nacimientos prematuros o con baja masa corporal al nacer, entre otros), alteración de las funciones del sistema endocrino por la introducción de disruptores endocrinos a través de la respiración, estrés oxidativo a nivel celular ocasionado por sustancias que se inhalan, conducente a problemas relacionados con distintos tipos de cáncer; el posible transporte e introducción en el organismo de distintos virus, incluyendo el SARS-CoV-2.

Cápsula # 2

Las partículas finas que se encuentran suspendidas en el aire (menores a 10 μm) se pueden inhalar cuando se respira. Mientras menor es su diámetro efectivo, más penetran en el sistema respiratorio hasta llegar a los alvéolos pulmonares; por su parte, las más pequeñas pueden penetrar incluso en el torrente sanguíneo. Estas partículas y los contaminantes orgánicos que las acompañan pueden ocasionar diversas enfermedades vasculares, afectar el sistema respiratorio, alterar el funcionamiento de las glándulas endocrinas e incluso propiciar la aparición de cáncer.

En este tenor, un tema de actualidad en los medios de comunicación, redes sociales y en la interacción cotidiana de la ciudadanía poblana es la contaminación del río Atoyac. El tema ha sido tratado por entidades de gobierno, diferentes Organizaciones No Gubernamentales, instituciones de educación públicas y privadas, entre otras, dada la visibilidad del problema, motivando que se lleguen a acuerdos entre los gobiernos de Tlaxcala y Puebla para atender de manera conjunta el asunto, pues se comparten muchos aspectos hidrográficos, económicos y sociales en las cuencas vecinas de los ríos Zahuapan y Atoyac. Hasta qué punto la contaminación de los ríos coadyuva a la afectación de la calidad del aire en las inmediaciones de estos cuerpos de agua se abordará más adelante.

Referencias

- Amador-Muñoz, O., Bazán-Torija, S., Villa-Ferreira, S. A., Villalobos-Pietrini, R., Bravo-Cabrera, J. L., Munive-Colín, Z., Hernández-Mena, L., Saldarriaga-Noreña, H., & Murillo-Tovar, M. A. (2013). Opposing seasonal trends for polycyclic aromatic hydrocarbons and PM10: Health risk and sources in southwest Mexico City. *Atmospheric Research*, 122, 199-212. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.003>
- Deng, Q., Deng, L., Miao, Y., Guo, X., & Li, Y. (2019). Particle deposition in the human lung: Health implications of particulate matter from different sources. *Environmental Research*, 169, 237-245. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.014>
- Diputados, C. de. (2022). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 11 de abril de 2022*. H. Congreso de la Unión. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgeepa.htm>
- DOF. (2021). *Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM10 y PM2.5. valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0
- INEGI. (2022). *Cuentas Económicas y Ecológicas de México 2021*. Comunicado de Prensa 717/22, 01/12/2022. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2022/CEEM/CEEM2021.pdf>
- Jmarchn. (2016). *File:Respiratory system complete no labels.svg*. WIKIMEDIA COMMONS. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Respiratory_system_complete_no_labels.svg

- Kim, K.-H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 74, 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>
- Mallah, M. A., Changxing, L., Mallah, M. A., Noreen, S., Liu, Y., Saeed, M., Xi, H., Ahmed, B., Feng, F., Mirjat, A. A., Wang, W., Jabar, A., Naveed, M., Li, J.-H., & Zhang, Q. (2022). Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: An overview. *Chemosphere*, 296, 133948. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133948>
- NASA. (2023). *Getting to the Heart of the (Particulate) Matter. NASA's MAIA to Study How Particulate Matter Air Pollution Affects Our Health*. <https://climate.nasa.gov/news/3027/getting-to-the-heart-of-the-particulate-matter/>
- OMS. (2021). *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021*. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>
- OMS. (2022). *Global Health Data Repository. Joint effects of air pollution. Data by country*. <https://apps.who.int/gho/data/node.main.ENVHEALTHJOINTAAPHAP?lang=en>
- OMS. (2023). *Contaminación atmosférica*. https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution#tab=tab_1 en enero de 2023
- OpenStax College. (2018). *File: 2309 The respiratory Zone.jpg*. WIKIMEDIA COMMONS. https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:2309_The_Respiratory_Zone_esp.jpg
- Quintana-Belmares, R. O., Krais, A. M., Esfahani, B. K., Rosas-Pérez, I., Mucs, D., López-Marure, R., Bergman, Å., & Alfaro-Moreno, E. (2018). Phthalate esters on urban airborne particles: Levels in PM10 and PM2.5 from Mexico City and theoretical assessment of lung exposure. *Environmental Research*, 161, 439-445. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.039>
- Sánchez-Piñero, J., Novo-Quiza, N., Moreda-Piñeiro, J., Turnes-Carou, I., Muniategui-Lorenzo, S., & López-Mahía, P. (2022). Multi-class organic pollutants in atmospheric particulate matter (PM2.5) from a Southwestern Europe industrial area: Levels, sources and human health risk. *Environmental Research*, 214, 114195. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114195>

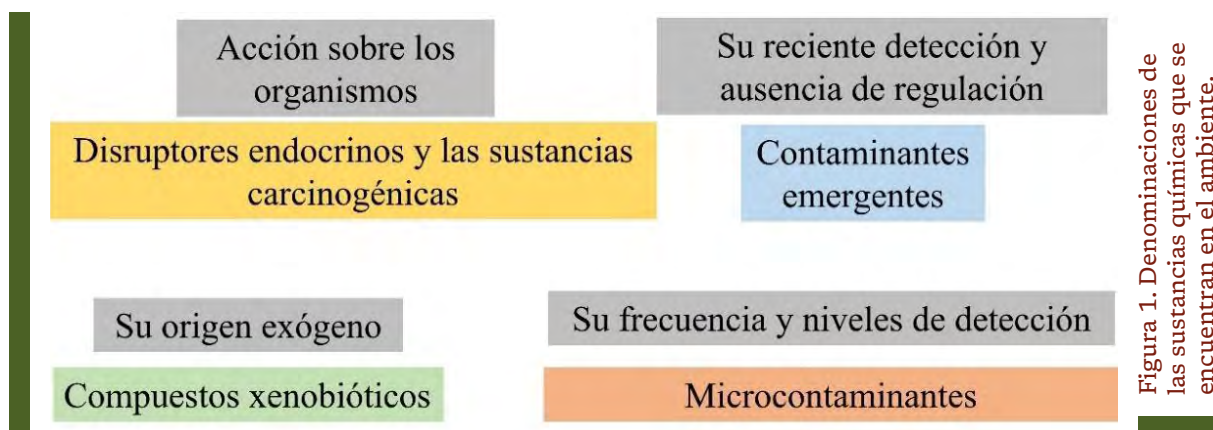
- Sanità di Toppi, L., Sanità di Toppi, L., & Bellini, E. (2020). Novel Coronavirus: How Atmospheric Particulate Affects Our Environment and Health. *Challenges*, 11(1), 6. <https://doi.org/10.3390/challe11010006>
- USEPA. (2022a). *Criteria Air Pollutants*. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- USEPA. (2022b). *Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM)*. <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>
- USEPA. (2022c). *Particulate Matter Basics*. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#:~:text=PM stands for particulate matter,seen with the naked eye>
- Wang, F., Liu, J., & Zeng, H. (2020). Interactions of particulate matter and pulmonary surfactant: Implications for human health. *Advances in Colloid and Interface Science*, 284, 102244. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102244>
- Wang, G., Xu, Y., Huang, L., Wang, K., Shen, H., & Li, Z. (2021). Pollution characteristics and toxic effects of PM1.0 and PM2.5 in Harbin, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(11), 13229-13242. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11510-8>

Los contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes (CE) presentes en agua son todas aquellas sustancias químicas de diferente origen ya sea orgánico (todas aquellas relacionadas con la vida, y se componen de carbono, de oxígeno o hidrógeno) e inorgánico (toda sustancia que carece de átomos de carbono en su composición química, con algunas excepciones) que ensucian el agua de ríos, océanos, subterránea, presas, etc., pero que aún no son reglamentadas por alguna autoridad. Estas sustancias provocan efectos malos en el mismo medio ambiente y en la salud de los seres vivos que lo habitan, debido a su toxicidad y acumulación. Algunos ejemplos de CE son: medicinas, bloqueadores solares, microplásticos, teflón de las sartenes, fragancias, desodorantes, tintes para el pelo, pinturas y barnices, detergentes, pesticidas, etc.

El desarrollo tecnológico, el agotamiento o insuficiencia de determinados productos naturales y el crecimiento de la población, entre otros factores, ha conllevado el incremento en la cantidad y tipos de sustancias químicas que el ser humano produce para satisfacer sus necesidades. Según evidencias del análisis de 22 inventarios de 19 países, se encuentran registradas para su producción y uso 350,000 sustancias químicas y sus mezclas (Wang *et al.*, 2020), siendo esta cifra muy inferior a los cientos de millones que aparecen en el registro CAS (Chemical Abstracts Service) de la American Chemical Society (CAS, 2023). Algunas de estas sustancias químicas se designan como **“probables carcinógenos humanos”**, mientras que otros, como los productos farmacéuticos y los productos de cuidado personal, se consideran sustancias químicas disruptoras endocrinas, que **alteran la función normal de las hormonas en el cuerpo humano**. Su exposición a niveles de trazas puede conducir a problemas graves de salud y dañar a los ecosistemas debido a su bioacumulación. El destino final de los contaminantes emergentes es el ambiente (aire, agua, sedimentos y organismos), lo que implica la necesidad de su evaluación toxicológica (Brooks *et al.*, 2020). Es necesario considerar que la gran cantidad de sustancias químicas de origen natural o antrópico ha determinado que se utilicen

muchas denominaciones distintas para designarlas, lo que puede traer confusión. En la Figura 1 se muestran las principales (Navarro-Frómeta, 2019).



Importancia de los contaminantes emergentes

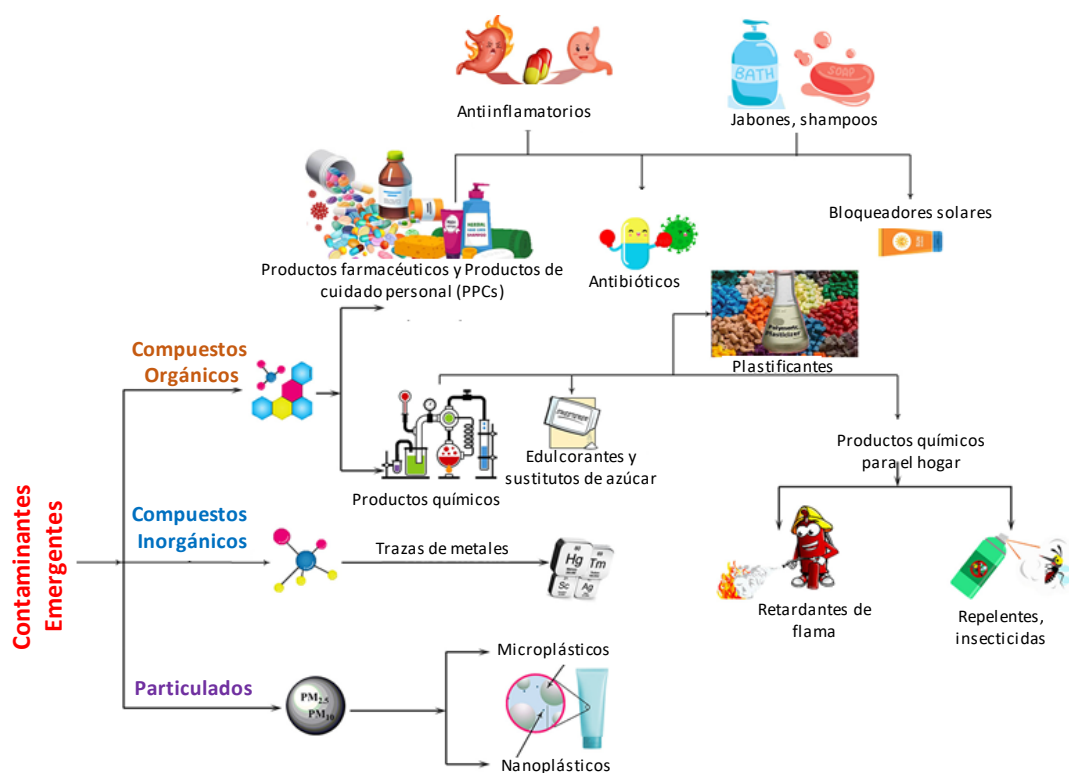
Los contaminantes emergentes (CE), más recientemente denominados como contaminantes de preocupación emergente, son compuestos o sustancias químicas de distinto origen y naturaleza, cuya presencia en el ambiente no había sido detectada, no se consideró preocupante o sus posibles consecuencias han pasado inadvertidas en gran medida; el principal compartimento ambiental en el que por su uso, disposición o destino final se encuentran es el agua. Por ello, causan efectos visibles en los ecosistemas acuáticos y representan un gran riesgo para la salud humana (United States, Environmental Protection Agency, USEPA, 2021). Se entiende a los CE como aquellos contaminantes previamente desconocidos o no reconocidos que no están lo suficientemente investigados ni regulados y aún hace falta desarrollar métodos de análisis más sensibles para su monitoreo, detección y cuantificación en todo tipo de agua (aguas superficiales y subterráneas, así como en agua para consumo humano y residual), además de conocer su comportamiento y su dispersión (Cunha *et al.*, 2021) the Itaipu–Piratininga lagoon system has suffered a series of environmental impacts, among which water pollution stands out. In this context, the aim of this study was to analyse the occurrence of pharmaceuticals and endocrine disrupters in water (dissolved and particulate phases. Generalmente, son clasificados en tres grandes categorías: farmacéuticos, productos de cuidado personal y disruptores endocrinos, aunque pueden comprender también los nanomateriales, drogas ilegales, productos de la ingeniería genética, entre otros (Antunes *et al.*, 2021). En la Figura 2 se muestran algunos ejemplos de CE (Antunes *et al.*, 2021).

Su presencia en el ambiente es el resultado del vertido de aguas residuales sin el debido tratamiento, de la urbanización descontrolada, del desarrollo de la industria, de las

actividades de atención de la salud esenciales para sustentar el bienestar humano, la agricultura y el transporte. Incluyen una amplia gama de sustancias producidas por la humanidad, consideradas indispensables para la vida moderna (Castañeta *et al.*, 2020; Peña-Guzmán *et al.*, 2019; Ross *et al.*, 2018; Vasilachi *et al.*, 2021)

- Su vertido constante y creciente (a medida que la población aumenta) a los cuerpos de agua, pues son productos de uso cotidiano por los seres humanos en sus distintas actividades. Aunque degradables, esto los convierte en compuestos pseudopersistentes.
- La utilización de aguas residuales para el riego.
- La mayoría son solubles en agua, por lo que son capaces de penetrar en todas las etapas del ciclo del agua, incluyendo el agua subterránea, que se considera más protegida que la superficial, planteando un serio peligro para las redes de suministro de agua potable. Además, penetran por diferentes vías en la biota acuática.
- El desconocimiento de su grado de remoción en los sistemas de tratamiento convencionales. De hecho, muchos no son removidos en los mismos eficientemente.
- El desarrollo de métodos nuevos y más sensibles de análisis químico y biológico que permiten detectarlos e investigar sus efectos.
- El efecto negativo que tiene un grupo de ellos sobre los sistemas endocrinos de los seres vivos.

Figura 2. Ejemplos de contaminantes emergentes (adaptada de Antunes *et al.*, 2021).



Es conveniente recalcar que los sistemas convencionales de tratamiento no resultan eficientes para remover los CE (Kumar *et al.*, 2022). Esto implica que hay que acudir a tratamientos terciarios en estas plantas convencionales o acudir a los procesos avanzados de tratamiento que resultan costosos y demandantes de energía. Algunas de las características de interés y preocupación se resumen en la Tabla 1.

Cápsula # 1

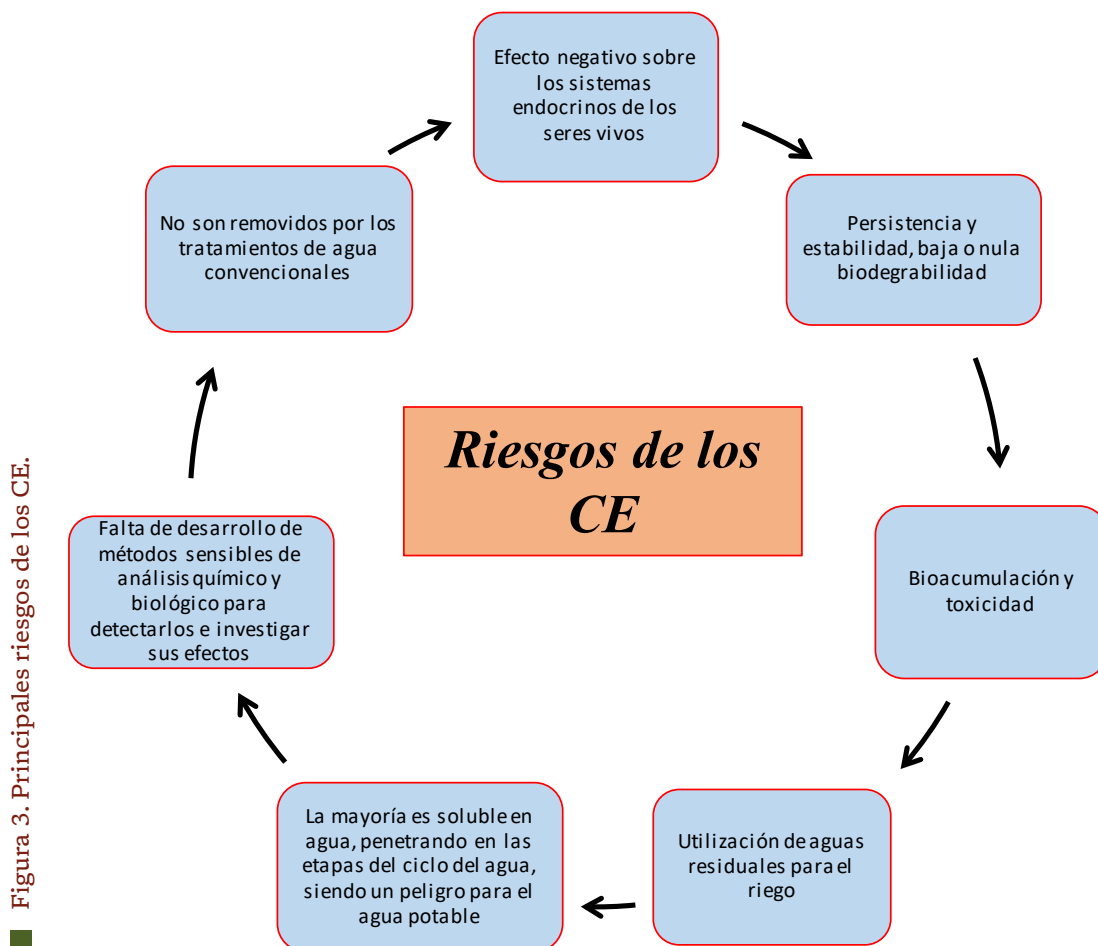
La principal preocupación con los contaminantes emergentes, CE, radica en su vertido constante y creciente a los cuerpos de agua a medida que la población aumenta, debido a que son productos de uso cotidiano por los seres humanos en sus distintas actividades.

Tabla 1. Principales características de preocupación

Son compuestos de origen antropogénico o natural que se han identificado durante las últimas décadas en el ambiente (aire, agua, sedimentos y organismos)	No están regulados y hay un desconocimiento parcial o total de su toxicidad y comportamiento ambiental
Aunque estos se encuentren en concentraciones bajas (partes por billón (ppb) o partes por trillón (ppt)), por el principio de precaución se hace necesaria su vigilancia, ya que la mayor parte de ellos son productos biológicamente activos	Las aguas residuales domésticas y municipales se han convertido prácticamente en aguas con alto contenido de químicos

Actualmente, en México, no existen regulaciones para los CE (Jacobo-Marín y Santa-cruz de León, 2021), además de que los sistemas de tratamiento de aguas residuales que operan se diseñaron para depurar sólidos, materia orgánica disuelta y nutrientes, por lo que muchos CE pasan el proceso de tratamiento con poca o ninguna modificación en su concentración. Además, un volumen considerable de las aguas residuales se vierte a los cuerpos de agua sin tratamiento alguno. Pese a que aún resultan insuficientes los estudios de los niveles de CE en las aguas residuales, la evidencia científica indica su presencia ubicua en los cuerpos de agua del país en niveles de partes por billón y partes por trillón, capaces de producir efectos negativos en la salud humana y de los ecosistemas (Navarro-Frómeta, 2019; Vázquez-Tapia *et al.*, 2022).

Los ríos de Puebla y Tlaxcala también se ven afectados por este problema, con niveles muy preocupantes de estos contaminantes (Hernandez-Ramirez *et al.*, 2019; Herrera *et al.*, 2019; Navarro-Frómeta y Navarrete-Rosas, 2020). Asegurar la eliminación de CE del ambiente requiere el trabajo continuo de investigación, con el fin de desarrollar métodos de detección y procesos de eliminación eficientes sobre la base de la sostenibilidad. Sus principales riesgos se ilustran en la Figura 3.



Fuentes de entrada

La principal fuente de entrada de estos compuestos en el ambiente son las aguas residuales, debido a su escaso tratamiento, aunque también cabe destacar el papel de la agricultura y ganadería como fuentes de contaminación difusa de plaguicidas y antibióticos, respectivamente. Su presencia ha ido en aumento debido al uso de las fuentes que los generan, creciendo a un ritmo imparable.

Los CE se originan en fuentes animales o humanas, ya sea descargadas directamente en cuerpos de agua o lixiviadas lentamente a través de los suelos, por lo que la calidad del agua se deteriora y el agua potable se contamina. Las aguas residuales municipales, industriales y domésticas son una vía principal para su amplia difusión en el ambiente acuático y desafortunadamente las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) convencionales no cuentan con la capacidad para la remoción de los CE. Sin embargo, muchos se pueden encontrar en diferentes áreas donde nunca han sido utilizados, debido a sus propiedades, tales como persistencia durante el transporte a larga distancia y la bioacumulación. Pueden dispersarse por difusión en el suelo, la atmósfera o los cuerpos de agua a través de varias formas o mecanismos que dependen en gran medida de las propiedades de los CE (polaridad, volatilidad, persistencia, etc.) y algunos de sus metabolitos se liberan al ambiente a través de varias rutas desde la industria, los hogares, los hospitales, tierras, etc. (Figura 4), entrando en aguas superficiales y subterráneas.

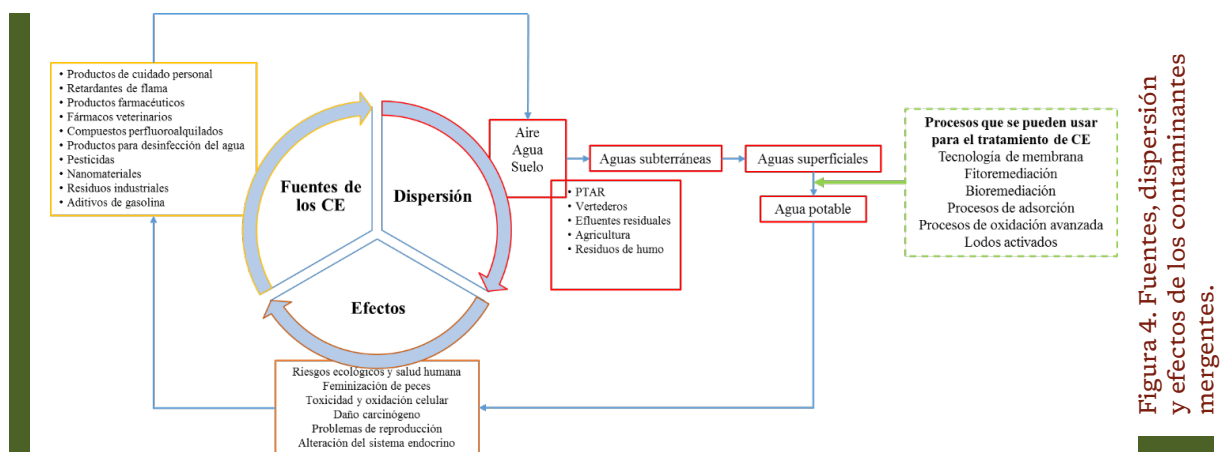


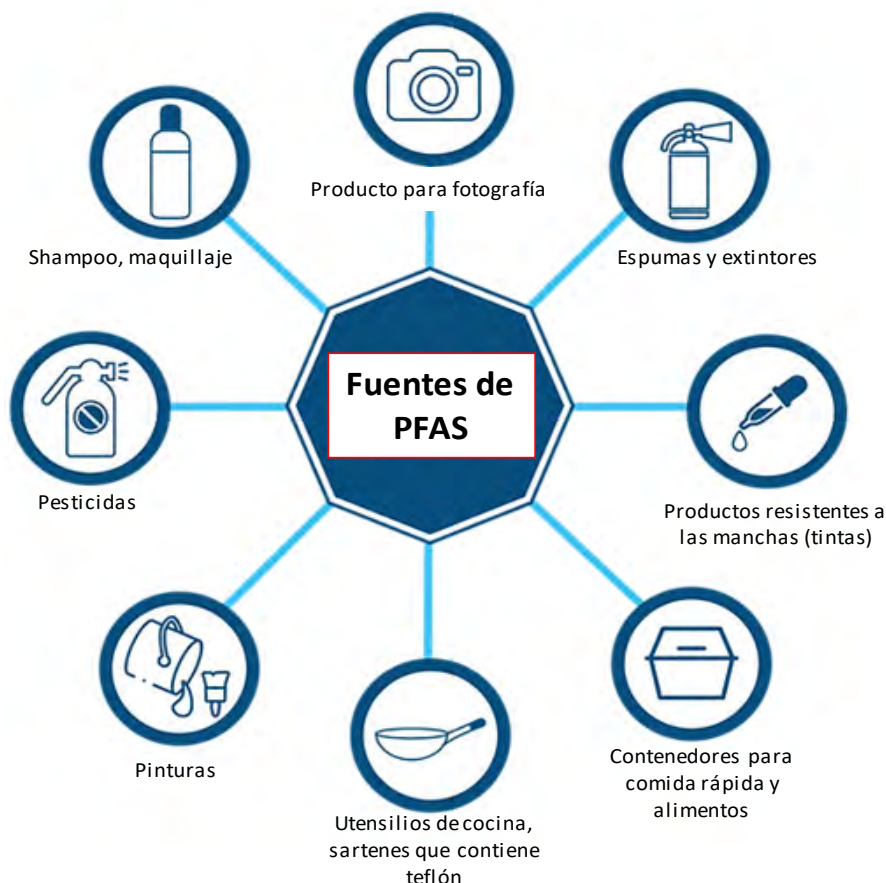
Figura 4. Fuentes, dispersión y efectos de los contaminantes emergentes.

Principales CE

En la Tabla 2, se muestra un resumen de los principales CE, así como sus aplicaciones y efectos en la salud y en el ecosistema. En este grupo se encuentran las sustancias perfluoroalquiladas (PFAS) que son compuestos de uso industrial que han sido utilizados durante décadas en un amplio número de sectores y productos, y que ahora se descubren como contaminantes peligrosos. Se sabe que las principales vías de entrada de las PFAS en el ambiente son las aguas residuales, entre las que se incluyen las urbanas e industriales.

Las PFAS son una familia de más de 3,000 productos químicos (Han *et al.*, 2006) conocidos como “las sustancias químicas eternas” (Figura 5).

Figura 5. Ejemplo de fuentes de PFAS.



Otro grupo grande e importante de CE son los fármacos. Entre los más prescritos en medicina humana destacan los analgésicos/antiinflamatorios, como el ibuprofeno y el diclofenaco; los antiepilépticos, como la carbamazepina; los antibióticos, como la amoxicilina y el sulfametoxazol; y los β -bloqueantes, como el metoprolol. Un 30-90 % de los fármacos se eliminan en forma de sustancia activa por la orina y terminan en las aguas residuales. Ensayos de toxicidad aguda sobre organismos acuáticos sugieren un bajo riesgo ecotoxicológico (Fent *et al.*, 2006). En cambio, esta situación pareciera ser diferente cuando se consideran efectos crónicos debido a que los organismos acuáticos están expuestos a bajas concentraciones a lo largo de todo su ciclo de vida (Pal *et al.*, 2014).

Los productos de cuidado personal son productos químicos que se encuentran ampliamente en entornos urbanos e incluyen fragancias, protectores solares, repelentes de insectos y agentes antifúngicos, entre otros (Reyes *et al.*, 2021). Como son para uso externo, no producen cambios metabólicos en su estructura química y se liberan fácilmente en ambientes acuáticos. Su presencia en la escorrentía urbana y el agua subterránea también ha aumentado significativamente en los últimos años.

Tabla 2. Familias de los contaminantes emergentes más ampliamente distribuidos.

<i>Familia</i>	<i>Ejemplo</i>	<i>Uso/aplicación</i>	<i>Efectos toxicológicos</i>
Fármacos	Etinilestradiol	Anticonceptivo oral	Feminización de peces
Productos de cuidado personal	Galaxolide	Colonias y detergentes	Inhibidor de los transportadores de resistencia a multi-xenobióticos
Compuestos perfluorados	Ácido perfluorooctanoico	Sartenes antiadherentes con teflón	Toxicidad celular y posible agente carcinogénico en humanos
Tensoactivos	Octilfenol	Detergentes industriales	Feminización de peces
Aditivos de polímeros	Bisfenol A	Producción de plásticos	Feminización de peces
Plaguicidas polares	Terbutialazina	Herbicida	Clasificado como posible carcinógeno
Drogas de abuso	Anfetamina	Aplicaciones médicas	Hepatotóxico en peces
Retardantes de llama	Difenil éter polibromado	Plásticos y espumas	Impacto en el desarrollo, crecimiento y reproducción de crustáceos
Nanopartículas	Fullerenos	Nanomateriales	Posible daño celular por oxidación
Microplásticos			Transferencia a la cadena trófica, humanos en la cúspide. Transporte de otros microcontaminantes

(Fuente: Jain, Mishra y Khare, 2021; Vasilachi *et al.*, 2021)

Soluciones para la eliminación de los CE

Actualmente, se están explorando procesos o tecnologías para aplicarse en la remoción de los CE. En forma general, dependiendo de la naturaleza y estructura química, los CE pueden ser removidos por procesos fisicoquímicos, biológicos y métodos de oxidación, teniendo ventajas y desventajas. Algunos ejemplos son: procesos de tratamiento tales como lodos activados, reactor por lotes de secuenciación, reactor biológico de membrana, tratamiento con carbón activado, tratamiento con nanotubos de carbono, lodo anaerobio de flujo ascendente, electrooxidación y procesos de oxidación avanzada (UV/H₂O₂, Fenton y tratamiento de ozono), aplicación de nanomateriales en procesos fotocatalíticos, etcétera. No obstante, uno de los métodos de filtración basados en membra-

nas, como la ultrafiltración y nanofiltración, se considera como una de las tecnologías que promete la mejor eliminación de microcontaminantes en el agua (Peña-Guzmán *et al.*, 2019; Shahid *et al.*, 2021; Vasilachi *et al.*, 2021). En la Tabla 3, se presentan algunos ejemplos de tratamiento y aplicación.

Conclusiones

Los contaminantes emergentes en el ambiente son cada vez más un problema crítico. Se requieren de técnicas para el monitoreo y análisis del agua para estos compuestos, que se encuentran en concentraciones que pueden llegar en su cota inferior a las partes por trillón (ng/L). Su impacto en la salud ambiental y humana es significativo, por lo que estudiar su toxicidad y eliminación del agua son puntos cruciales que se deben abordar de manera estricta, así como proponer regulaciones de cumplimiento obligatorio para los mayores contaminadores, con un control sistemático y transparente de sus descargas. Además, los procesos para la eliminación de los CE deben ser efectivos, de bajo costo económico y energético, así como amigables con el ambiente. Indiscutiblemente, una de las áreas en la que la ciudadanía puede intervenir para reducir su impacto en el ambiente es en el uso que se les da a estos productos y cómo se disponen, por ejemplo, los fármacos que ya no se utilizan o han caducado.

Tabla 3. Comparación de algunos procesos de remoción.

<i>Proceso de tratamiento</i>	<i>Características de la remoción</i>	<i>Compuestos que remueve</i>
Biorremediación	Degradación a través del metabolismo de los microorganismos	Plaguicidas, fármacos
Fitorremediación	Económicamente eficiente, el proceso es independiente, tolerancia a la toxicidad y a la bioacumulación	Compuestos poliaromáticos, plaguicidas clorados y organofosfatos, detergentes, bifenilos policlorados o BPC, explosivos, radionúclidos, metales
Procesos de oxidación avanzada	Degradación alta, emplea agentes de oxidación como ozono, peróxido de hidrógenos, aire, oxígeno, etc. Se puede combinar con irradiación UV y catalizadores. Formación de subproductos tóxicos de la desinfección, interferencia de captadores de radicales	Compuestos orgánicos e inorgánicos, aromáticos, plaguicidas, componentes de petróleo, volátiles orgánicos

Tecnología de membrana	Barrera física semipermeable, su eficiencia aumenta de nanofiltración a ósmosis inversa. Algunos compuestos pueden escapar durante la filtración. Alta demanda de energía, ensuciamiento de membranas y problema de eliminación	Es el método más eficaz de remover disruptores endocrinos presentes en agua residual
Lodos activados	Degradación deficiente, amigable con el ambiente, inadecuado, donde la demanda química de oxígeno (DQO) es superior a 4000 mg/L	Estrógenos y ácido salicílico, otros fármacos
Adsorción	Fácil de operar, costo bajo de inversión, remueve toxinas, el adsorbente se puede regenerar. Requiere de agitación constante	Esteroides, hormonas, otros fármacos, PFAS, plaguicidas, productos de cuidado personal, parabenos
Humedales	Alternativa prometedora como paso terciario, pero también como sistemas de tratamiento primario y secundario (para la eliminación de sustancias orgánicas y nutrientes) debido a bajos costos de energía, operación y mantenimiento, y buena eficiencia de tratamiento	Productos de cuidado personal, fármacos

Referencias

- Antunes, E., Vuppaladadiyam, A. K., Sarmah, A. K., Varsha, S. S. V., Pant, K. K., Tiwari, B., y Pandey, A. (2021). Application of biochar for emerging contaminant mitigation. En A. K. Sarmah (Ed.), *Biochar: Fundamentals and Applications in Environmental Science and Remediation Technologies* (pp. 65-91). <https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2021.08.003>
- Brooks, B. W., Sabo-Attwood, T., Choi, K., Kim, S., Kostal, J., LaLone, C. A., Langan, L. M., Margiotta-Casaluci, L., You, J., y Zhang, X. (2020). Toxicology Advances for 21st Century Chemical Pollution. *One Earth*, 2(4), 312-316. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.04.007>
- CAS. (2023). *CAS Registry*. <https://www.cas.org/cas-data/cas-registry>
- Castañeta, G., Gutierrez, A. F., Nacaratte, F., y Manzano, C. A. (2020). Microplásticos: un contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles

- riesgos para la salud pública por exposición. *Revista Boliviana de Química*, 37(3), 142-157. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S0250-54602020000300005&script=sci_abstract
- Cunha, D. L., Muylaert, S., Nascimento, M. T. L., Felix, L. C., Gomes, G., Bila, D. M., y Fonseca, E. M. (2021). Occurrence of emerging contaminants and analysis of oestrogenic activity in the water and sediments from two coastal lagoons in south-eastern Brazil. *Marine and Freshwater Research*, 72(2), 213. <https://doi.org/10.1071/MF19391>
- Fent, K., Weston, A., y Caminada, D. (2006). Ecotoxicology of human pharmaceuticals. *Aquatic Toxicology*, 76(2), 122-159. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2005.09.009>
- Han, G. H., Hur, H. G., y Kim, S. D. (2006). Ecotoxicological risk of pharmaceuticals from wastewater treatment plants in Korea: Occurrence and toxicity to *Daphnia magna*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25(1), 265. <https://doi.org/10.1897/05-193R.1>
- Hernandez-Ramirez, A. G., Martinez-Tavera, E., Rodriguez-Espinosa, P. F., Mendoza-Pérez, J. A., Tabla-Hernandez, J., Escobedo-Urías, D. C., Jonathan, M. P., y Sujitha, S. B. (2019). Detection, provenance and associated environmental risks of water quality pollutants during anomaly events in River Atoyac, Central Mexico: A real-time monitoring approach. *Science of The Total Environment*, 669, 1019-1032. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.138>
- Herrera, J. A., Navarro, A., Burgos, S., Marrugo, J. L., y Bayona, J. (2019). Presencia e impacto de los contaminantes emergentes en aguas superficiales. En A. E. Navarro-Frómata, Z. C. Leyva-Inzunza, y J. C. Mendoza-Hernández (Eds.), *Tópicos sobre contaminantes y contaminación del agua* (pp. 31-52). AM Editors, Technological University of Izúcar de Matamoros.
- Jacobo-Marín, D., y Santacruz de León, G. (2021). Contaminantes emergentes en el agua: Regulación en México, principio precautorio y perspectiva comparada. *Revista de Derecho Ambiental*, 15, 51. <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2021.57414>
- Jain, S., Mishra, D., y Khare, P. (2021). Microplastics as an Emerging Contaminant in Environment: Occurrence, Distribution, and Management Strategy. En *Management of Contaminants of Emerging Concern (CEC) in Environment* (pp. 281-299). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822263-8.00010-5>

- Kumar, M., Ngasepam, J., Dhangar, K., Mahlknecht, J., y Manna, S. (2022). Critical review on negative emerging contaminant removal efficiency of wastewater treatment systems: Concept, consistency and consequences. *Bioresource Technology*, 352, 127054. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127054>
- Navarro-Frómeta, A. E. (2019). Consideraciones sobre el estudio de los microcontaminantes orgánicos en México. En A. Garrido-Mora y M. del C. Durán-Domínguez-de-Bazúa (Eds.), *Memorias del Noveno Minisimposio Internacional sobre Remoción de Contaminantes de Aguas, Atmósfera y Suelos* (pp. 143-152). <https://ambiental.unam.mx/albunimagenes/Libro-e-Book 2019 IX MSI-9th IMS-24-10-22.pdf>
- Navarro-Frómeta, A. E., y Navarrete-Rosas, D. (2020). Addressing Stressors to Riverine Waters Quality: The Case of the Nexapa River. En E. M. Otazo-Sánchez, A. E. Navarro-Frómeta, y V. P. Singh (Eds.), *Water Availability and Management in Mexico* (pp. 127-149). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24962-5_6
- Pal, A., He, Y., Jekel, M., Reinhard, M., y Gin, K. Y.-H. (2014). Emerging contaminants of public health significance as water quality indicator compounds in the urban water cycle. *Environment International*, 71, 46-62. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.05.025>
- Peña-Guzmán, C., Ulloa-Sánchez, S., Mora, K., Helena-Bustos, R., Lopez-Barrera, E., Alvarez, J., y Rodríguez-Pinzón, M. (2019). Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature. *Journal of Environmental Management*, 237, 408-423. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.100>
- Reyes, N. J. D. G., Geronimo, F. K. F., Yano, K. A. V., Guerra, H. B., y Kim, L.-H. (2021). Pharmaceutical and Personal Care Products in Different Matrices: Occurrence, Pathways, and Treatment Processes. *Water*, 13(9), 1159. <https://doi.org/10.3390/w13091159>
- Ross, I., McDonough, J., Miles, J., Storch, P., Thelakkat Kochunarayanan, P., Kalve, E., Hurst, J., S. Dasgupta, S., y Burdick, J. (2018). A review of emerging technologies for remediation of PFASs. *Remediation Journal*, 28(2), 101-126. <https://doi.org/10.1002/rem.21553>
- Shahid, M. K., Kashif, A., Fuwad, A., y Choi, Y. (2021). Current advances in treatment technologies for removal of emerging contaminants from water – A critical review. *Coordination Chemistry Reviews*, 442, 213993. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213993>

- USEPA. (2021). *Contaminants of Emerging Concern including Pharmaceuticals and Personal Care Products*. <https://www.epa.gov/wqc/contaminants-emerging-concern-including-pharmaceuticals-and-personal-care-products>
- Vasilachi, I., Asiminicesei, D., Fertu, D., y Gavrilescu, M. (2021). Occurrence and Fate of Emerging Pollutants in Water Environment and Options for Their Removal. *Water*, 13(2), 181. <https://doi.org/10.3390/w13020181>
- Vázquez-Tapia, I., Salazar-Martínez, T., Acosta-Castro, M., Meléndez-Castolo, K. A., Mählknecht, J., Cervantes-Avilés, P., Capparelli, M. V., y Mora, A. (2022). Occurrence of emerging organic contaminants and endocrine disruptors in different water compartments in Mexico – A review. *Chemosphere*, 308, 136285. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136285>
- Wang, Z., Walker, G. W., Muir, D. C. G., y Nagatani-Yoshida, K. (2020). Toward a Global Understanding of Chemical Pollution: A First Comprehensive Analysis of National and Regional Chemical Inventories. *Environmental Science y Technology*, 54(5), 2575-2584. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06379>

La importancia de la detección de los contaminantes y el papel de la implementación de biosensores

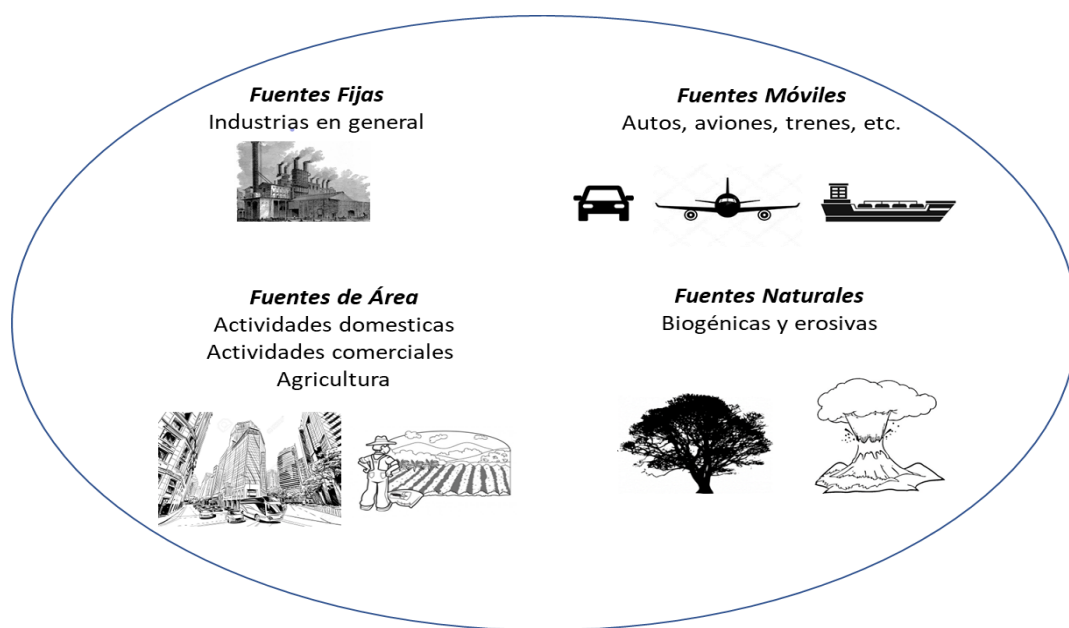
La importancia de poder determinar o sentir lo que está a nuestro alrededor, la podemos observar a partir de nuestro cuerpo: sensaciones de calor o frío, sentir las superficies ásperas o lisas, poder determinar sabores agrios, dulces o salados y el olor de la comida o del aire que está a nuestro alrededor. Así de importante es entonces poder determinar la presencia de sustancias que pudieran ser tóxicas o nocivas para nuestro cuerpo; las cuales pudieran estar presentes en el aire que respiramos, el agua que utilizamos para beber o regar los campos y en los alimentos que consumimos. Pero sería mejor aún poder determinar el tipo de sustancia presente (metales pesados, pesticidas, microorganismos patógenos, micro plásticos) y de ser posible la concentración en la que se encuentran, lo que nos permitiría poder tomar acciones de control para eliminar o disminuir la presencia de este tipo de contaminante. Para eso nos sirven los sensores.

La determinación de diversos analitos o contaminantes en una muestra es de gran interés en diversas áreas del conocimiento; incluso la determinación de un mismo analito puede ser necesaria para áreas de la ciencia que pudieran verse no interrelacionadas. Por ejemplo, la determinación de contaminantes en el ambiente o en la superficie del planeta permitiría saber su efecto en otras áreas como la salud y los alimentos, debido a que los diversos contaminantes se encuentran en el aire que se respira, el agua que se bebe y la tierra donde se alimenta el ganado y se producen los alimentos. Si se toma en cuenta que la emisión de los contaminantes por diversas fuentes antropogénicas, asociadas con las actividades humanas, permiten el transporte, la difusión, el depósito, la adsorción o aspiración de los contaminantes presentes en la superficie del planeta, todos los seres vivos están expuestos a los diversos contaminantes. La grave contaminación de los espacios de tierra, aire y agua requiere de un monitoreo continuo y sistemático, que permita la determinación del o los contaminantes presentes en los diferentes espacios de la superficie de la tierra.

De hecho, de acuerdo con estimaciones de la Organización Mundial de la Salud en 2019, 99 % de la población global vive en lugares donde la calidad del aire es mala (OMS, 2022). Por su parte, la Agencia Europea del Medio Ambiente reportó que en la Unión Europea en 2019 fallecieron prematuramente 307,000 personas por la exposición crónica a pequeñas partículas de contaminantes (AEMA, 2021). Algunas investigaciones a nivel mundial reportan más de 3 millones de muertes cada año (Lewis y Edwards, 2016). El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) reporta que más de 3000 millones de personas se ven afectadas por la degradación de los ecosistemas derivada de la contaminación ambiental, causando unas 9 millones de muertes prematuras cada año. La contaminación ha causado que más de un millón de especies de plantas y animales estén en peligro de extinción, todo esto a pesar de que desde hace más de 50 años las y los dirigentes del mundo se comprometieron a proteger el planeta (PNUMA, 2022).

Las fuentes de contaminación son diversas y muy variadas. De hecho, cualquier acción del ser humano, y en general de los seres vivos, genera residuos, y muchos de ellos en alguna etapa de su degradación provocan algún tipo de contaminación. En la Figura 1 se presenta la clasificación de acuerdo con las fuentes de emisión de los diversos contaminantes.

Figura 1. Clasificación de los contaminantes por el tipo de fuente de emisión.



Si un país quisiera reducir los niveles de contaminación en sus espacios, debería primero lograr medir sus niveles de contaminación, para crear políticas ambientales que protejan la salud de las personas y, en general, de los seres vivos que habitan su territorio; y, al mismo tiempo, generar acciones de control en la emisión de los contaminantes presentes. Sin embargo, los equipos actuales y en muchos casos las tecnologías son

caras y difíciles de llevar a los espacios donde se presentan tasas de contaminación alta. En la Comunidad Europea, un equipo que incluya todos los sensores para los contaminantes presentes en la atmósfera tiene un valor de más de 2 millones de pesos (Pichel, 2019). Sin embargo, también hay que decirlo, existen equipos que utilizan toda la tecnología desarrollada por los seres humanos, que ayudan a tener un monitoreo en tiempo real de la contaminación de algunos contaminantes atmosféricos de manera remota (Chodorek *et al.*, 2022) y que se pueden instalar, tanto en interiores como en exteriores (Caron *et al.*, 2016; Leidinger *et al.*, 2014; Wolfrum *et al.*, 2006; Zampolli *et al.*, 2004).

Cápsula # 1

Todos los seres vivos están expuestos a la contaminación ambiental, la cual puede causar muerte prematura por la presencia de altos niveles de contaminación en el organismo.

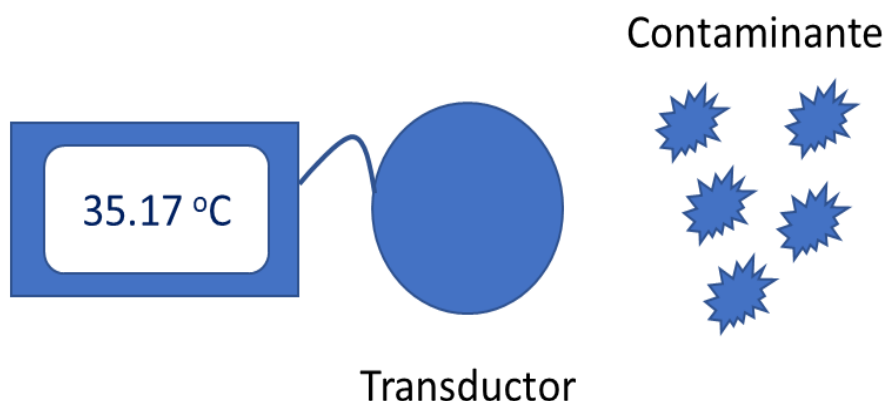
Los costos de los sistemas de medición pueden ser altos y su uso está regularmente en ciudades con un alto índice poblacional.

De manera general, los contaminantes se pueden clasificar en tres tipos: físicos, químicos y biológicos. Dentro de los químicos se encuentran los contaminantes emergentes, tales como los antibióticos, fármacos, microplásticos y drogas. Los químicos y los biológicos pueden ser bioacumulables y, en términos de afectaciones a la salud, se pueden clasificar en contaminación por microorganismos, contaminación por contaminantes químicos inorgánicos y contaminación por contaminantes químicos orgánicos. Sin importar su clasificación, cualquiera de estos contaminantes, de manera directa o indirecta, pueden causar efectos adversos a la salud, debido a su acumulación en los diferentes órganos del cuerpo. Entre las afectaciones a la salud están la interrupción del sistema endocrino, inducción de toxicidad o genotoxicidad, y efectos cancerígenos (Korostynska *et al.*, 2013); de aquí la importancia de poder determinar su presencia en los diferentes espacios del planeta.

La ciencia y la tecnología han desarrollado diversas herramientas que permiten la determinación de elementos contaminantes, generando dispositivos que sensan la presencia de los diferentes tipos de contaminantes debido a la limitada capacidad de los sentidos humanos para determinar la presencia de lo que sucede en el medio ambiente, ya que, aunque el olfato percibe algunos de ellos, como los compuestos con azufre, no todos los

contaminantes son percibidos con tanta precisión. Actualmente, los dispositivos de detección generados permiten que, a través de una pantalla, se muestre el valor del contaminante detectado por medio un sensor, el cual contiene un sistema de transducción de señales físicas o químicas a un valor de corriente (Figura 2). Esto significa que se obtiene una respuesta eléctrica por el proceso de detección, facilitando la lectura para el usuario, lo cual permite tomar acciones para el control de los contaminantes. Sin embargo, los dispositivos actuales tienen la desventaja de sufrir interferencias o problemas en la determinación del contaminante, debido a factores ambientales tales como la temperatura, la velocidad del viento, la humedad, entre otros (Smith *et al.*, 2017) including more localized warnings to the public. The current generation of single-chemical gas sensors experience degrees of interference from other co-pollutants and have sensitivity to environmental factors such as temperature, wind speed and supply voltage. There are uncertainties introduced also because of sensor-to-sensor response variability, although this is less well reported. The sensitivity of Metal Oxide Sensors (MOS).

Figura 2. Esquema general de un dispositivo de detección (elaboración propia).



Para tratar de resolver las desventajas que presentan los sensores actuales en la determinación de los contaminantes químicos y biológicos, se ha propuesto la aplicación de dispositivos que unen al elemento de transducción una molécula biológica, la cual reconoce selectivamente al contaminante. A la molécula biológica que se une al sistema de transducción, se le da el nombre de Elemento de Reconocimiento Biológico (ERB) y al dispositivo se le denomina ahora **Biosensor** (Figura 3) (Lee y Mutharasan, 2005). El primer biosensor fue desarrollado por Clark y Lyons en 1962 y fue para determinar glucosa en sangre (Clark y Lyons, 1962).

Cápsula # 2

Los biosensores tienen en su interior un Elemento de Reconocimiento Biológico (ERB) con alta afinidad y selectividad al contaminante a detectar.

Los dispositivos biosensores no se ven afectados por condiciones ambientales.

El ERB puede ser una proteína, una enzima, un anticuerpo, ARN, células o tejidos completos; esto permite que los dispositivos de sensado basados en este tipo de moléculas puedan ser más sensibles, más específicos, su costo sea menor y sus dimensiones puedan ser reducidas hasta el orden de micrómetros (Kawamura y Miyata, 2016). Por todas estas ventajas, este tipo de dispositivos pueden ser aplicados en la determinación de múltiples analitos en áreas de la salud, ambiente, control de alimentos, agroindustrias, entre otras (Bhalla *et al.*, 2016).

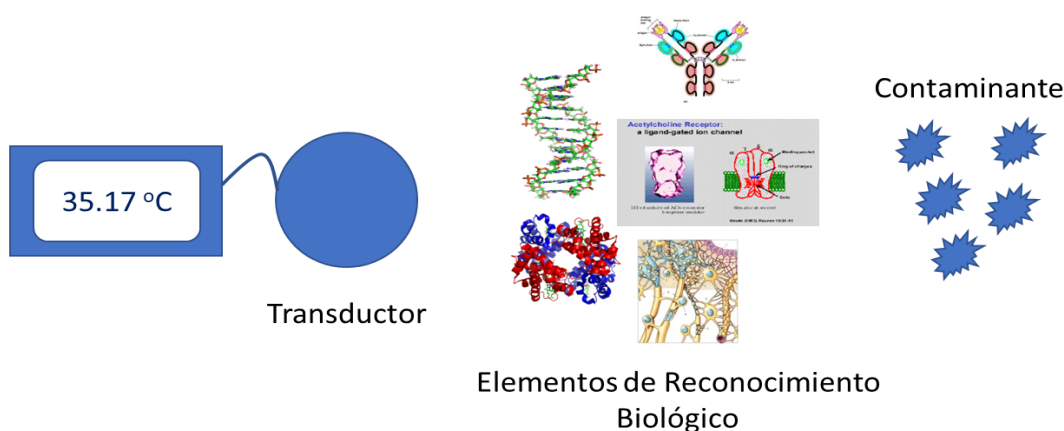


Figura 3. Esquema de un dispositivo biosensor.

La interacción entre el ERB y el contaminante genera una señal física o química que puede ser medible a través de parámetros eléctricos (voltajes, corrientes, resistencia, entre otros), ópticos (absorción, reflexión o transmisión de la luz), térmicos (variaciones

en temperatura), de elongación (cambios en la longitud de los materiales), principalmente (Chen y Wang, 2020). Los que mayor desarrollo y crecimiento han tenido en la investigación son los biosensores ópticos y electroquímicos. Sin embargo, los biosensores ópticos presentan una mayor inmunidad al ruido eléctrico, mayor sensibilidad, inmunidad a las condiciones ambientales y, por ende, mayor estabilidad. El primer biosensor óptico fue reportado en 1975 por Lübbers y Opitz basado en fibras ópticas (Opitz y Lübbers, 1975).

Muchos de estos dispositivos pueden incluso ser utilizados por la sociedad civil sin la necesidad de contar con un conocimiento amplio del tema, lo que permite su uso en el sitio mismo de contaminación, logrando un monitoreo social y, por ende, la apropiación de la tecnología por la sociedad. En algunos casos, esto se logra a través de observar los cambios en la coloración del dispositivo en función de la presencia del contaminante; la intensidad del color indica una mayor cantidad o concentración del contaminante detectado.

Como ejemplo de lo anterior, en la Figura 4 se presentan algunos dispositivos biosensores empleados en la determinación de aminas biógenas en matrices sólidas (4a) y matrices líquidas (4b), así como en la determinación de plaguicidas como endosulfan (4c). En la Figura 4d se presentan las dimensiones de los dispositivos desarrollados (Hernández-Castillo *et al.*, 2015; Severiano *et al.*, 2019).

Cápsula # 3

Los biosensores permiten la determinación de contaminantes químicos y biológicos con mayor precisión y selectividad.

Los biosensores ópticos pueden ser empleados en tiempo real por la población en general.

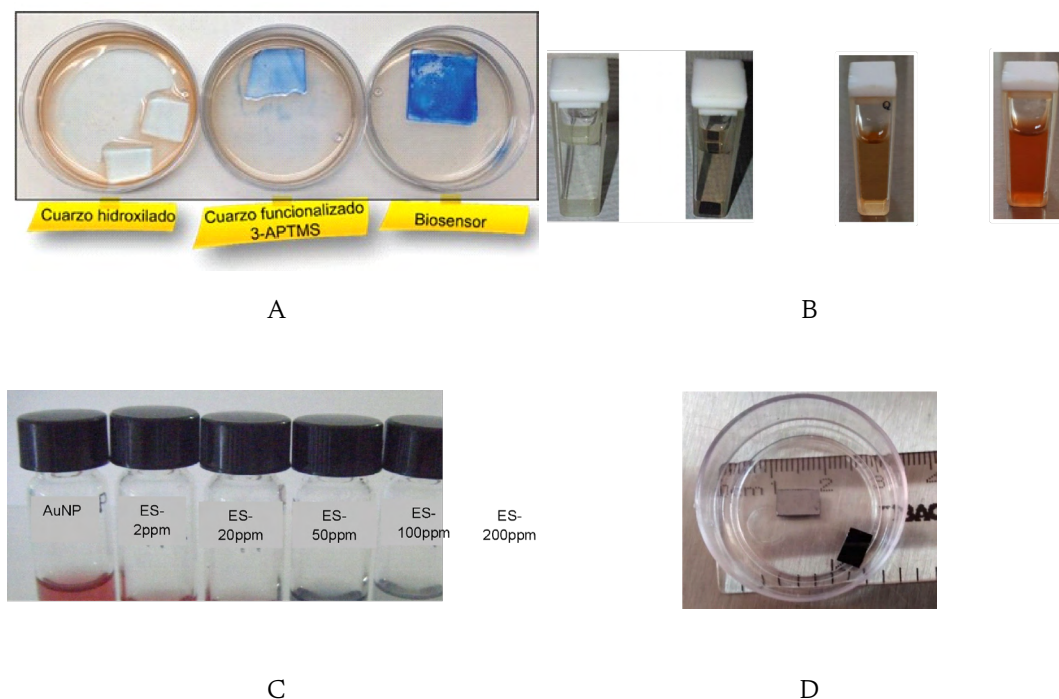
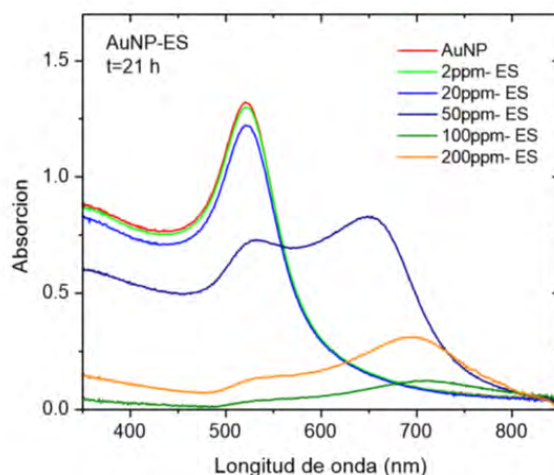


Figura 4. Dispositivos biosensores para la determinación *in situ* de contaminantes y su dimensionalidad.

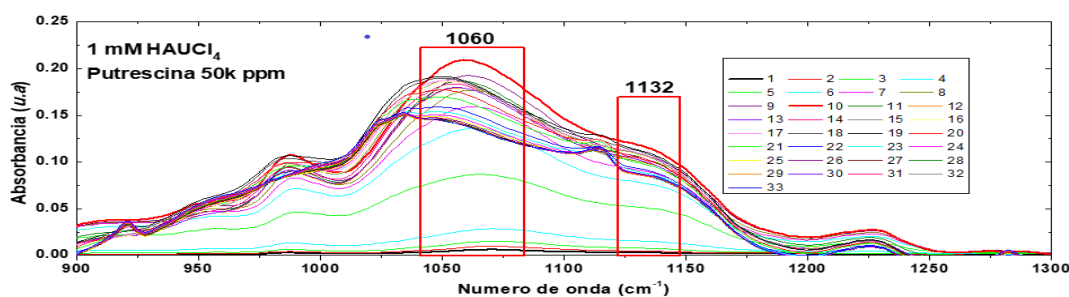
Los plaguicidas son contaminantes orgánicos producto de las actividades agroindustriales; aunque su uso ya debería estar limitado o eliminado, su presencia en los cuerpos de agua, la tierra y, por ende, en el ambiente significa un grave peligro para la salud de los seres vivos. Las aminas biógenas son elementos que están presentes en alimentos contaminados y sus altas concentraciones en el organismo pueden inducir problemas de salud, incluso cáncer.

Como se puede ver en la Figura 4, los dispositivos presentan una coloración inicial: sin color en el caso de aminas biógenas y rojo en el caso de nanopartículas de oro. Conforme el ERB interacciona o detecta el contaminante, el dispositivo (sólido o líquido) comienza a cambiar de tonalidad y este cambio se incrementa en función de la concentración del contaminante presente en la superficie analizada. Los cambios en la señal absorbida son monitoreados inicialmente mediante equipos de laboratorio, tales como la espectroscopia de ultravioleta y visible (UV/Vis) (Figura 5a), o la espectroscopia de infrarrojo (IR) (Figura 5b).

Figura 5. Espectros del seguimiento de la presencia de contaminantes: (a) Plaguicidas y (b) Aminas biógenas.



(a)



b)

Los valores de absorbancia son utilizados para determinar la concentración del contaminante a través de curvas de calibración con muestras estándares de cada caso. Una vez logrado lo anterior, se relacionan los cambios en coloración con las curvas generadas y, de esta manera, se pueden desarrollar dispositivos biosensores en laboratorios de investigación para ser aplicados en tiempo real y en el sitio donde se encuentran los contaminantes.

Si de alguna forma este tipo de dispositivos pudieran llegar a la sociedad civil, la apropiación de la ciencia, tecnología e innovación permitiría el monitoreo en tiempo real y

en el sitio por parte de la población, que convive día a día con el problema de contaminación en su localidad.

Sin embargo, hay que recalcar que la Apropiación Social de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación (ASCTI) es un proceso intencionado de comprensión e intervención de las relaciones entre ciencia, tecnología y sociedad, construido a partir de la participación de los diversos grupos sociales que generan conocimiento (Gregory y Miller, 1998), incluyendo saberes ancestrales. Este proceso tiene las siguientes características:

- Es organizado
- Está constituido por una red en la que participan grupos sociales, personas que trabajan en ciencia y tecnología, y ciudadanía
- Se realizan mediaciones para establecer articulaciones entre los distintos actores
- Posibilita el empoderamiento de la sociedad civil a partir del conocimiento
- Implica trabajo colaborativo y acuerdos a partir de los contextos e intereses de las personas involucradas

Los puntos 3 y 5 de las características del ASCTI requieren forzosamente del apoyo de los diferentes niveles de gobierno, que permitan y coadyuven la unión de criterios entre la academia y la sociedad, sin perder de vista la normatividad y reglamentación vigente. Si esto pudiera ser posible, las demandas sociales por problemas de contaminación y salud podrían verse disminuidas (Figura 6).

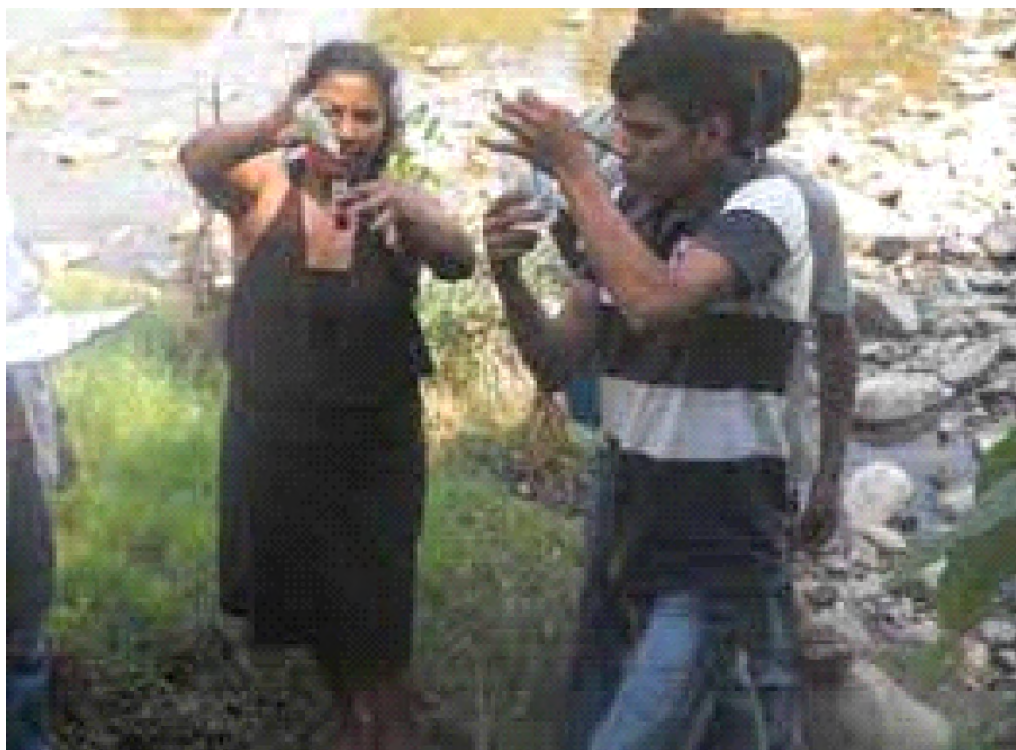


Figura 6. Apropiación de la Ciencia, Tecnología e Innovación.

Referencias

- AEMA. (2021). *Health impacts of air pollution in Europe 2021*. <https://doi.org/10.2800/08097>
- Bhalla, N., Jolly, P., Formisano, N., & Estrela, P. (2016). Introduction to biosensors. *Essays in Biochemistry*, 60(1), 1-8. <https://doi.org/10.1042/EBC20150001>
- Caron, A., Redon, N., Thevenet, F., Hanoune, B., & Coddeville, P. (2016). Performances and limitations of electronic gas sensors to investigate an indoor air quality event. *Building and Environment*, 107, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.006>
- Chen, C., & Wang, J. (2020). Optical biosensors: an exhaustive and comprehensive review. *The Analyst*, 145(5), 1605-1628. <https://doi.org/10.1039/C9AN01998G>
- Chodorek, A., Chodorek, R. R., & Yastrebov, A. (2022). The Prototype Monitoring System for Pollution Sensing and Online Visualization with the Use of a UAV and a WebRTC-Based Platform. *Sensors*, 22(4), 1578. <https://doi.org/10.3390/s22041578>
- Clark, L. C., & Lyons, C. (1962). Electrode Systems for Continuous Monitoring Cardiovascular Surgery. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 102(1), 29-45. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1962.tb13623.x>
- Gregory, J., & Miller, S. (1998). Initiatives and activities in the public understanding of science. En J. Gregory & S. Miller (Eds.), *Science in public: communication, culture and credibility* (pp. 220-241). Plenum Press.
- Hernández-Castillo, M. I., Zaca-Morán, O., Zaca-Morán, P., Orduña-Díaz, A., Delgado-Macuil, R., & Rojas-López, M. (2015). Surface-enhanced Raman scattering of the adsorption of pesticide endosulfan on gold nanoparticles. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 50(8), 584-589. <https://doi.org/10.1080/03601234.2015.1028841>
- Kawamura, A., & Miyata, T. (2016). Biosensors. En *Biomaterials Nanoarchitectonics* (pp. 157-176). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-37127-8.00010-8>
- Korostynska, O., Mason, A., & Al-Shamma'a, A. I. (2013). Monitoring Pollutants in Wastewater: Traditional Lab Based versus Modern Real-Time Approaches. En *Smart sensors for real time water quality monitoring* (pp. 1-24). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37006-9_1

- Lee, Y. H., & Mutharasan, R. (2005). Biosensors. En J. S. Wilson (Ed.), *Sensor Technology Handbook* (pp. 161-180). Elsevier-Newnes. https://doc.lagout.org/science/O_Computer Science/8_Electronics %26 Robotics/Sensor Technology Handbook - By J. Wilson.pdf
- Leidinger, M., Sauerwald, T., Conrad, T., Reimringer, W., Ventura, G., & Schütze, A. (2014). Selective Detection of Hazardous Indoor VOCs Using Metal Oxide Gas Sensors. *Procedia Engineering*, 87, 1449-1452. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.722>
- Lewis, A., & Edwards, P. (2016). Validate personal air-pollution sensors. *Nature*, 535(7610), 29-31. <https://doi.org/10.1038/535029a>
- OMS. (2022). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. [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)
- Optiz, N., & Lübbers, D. W. (1975). New Fast-Responding Optical Method to Measure PCO₂ In Gases and Solutions. *Pflugers Archiv-European Journal of Physiology*, 355, 120.
- Pichel, J. (2019, marzo 24). La polémica de los sensores «low cost»: por qué estamos midiendo mal la calidad del aire. *El Confidencial*. https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2019-03-24/sensores-low-cost-calidad-aire-contaminacion_1900134/
- PNUMA. (2022). *Medioambiente: Nuestro insostenible ritmo de vida representa una amenaza para el planeta*. <https://news.un.org/es/story/2022/06/1509732>
- Severiano, F., Gayou, V. L., Diaz, A. O., Contreras-Rozo, J. A., Gutiérrez, H. M., & Macuil, R. D. (2019). Porous Silicon Decorated with Gold Nanoparticles for Detection of Histamine. *Sensor Letters*, 17(8), 614-618. <https://doi.org/10.1166/sl.2019.4119>
- Smith, K. R., Edwards, P. M., Evans, M. J., Lee, J. D., Shaw, M. D., Squires, F., Wilde, S., & Lewis, A. C. (2017). Clustering approaches to improve the performance of low cost air pollution sensors. *Faraday Discussions*, 200, 621-637. <https://doi.org/10.1039/C7FD00020K>
- Wolfrum, E. J., Meglen, R. M., Peterson, D., & Sluiter, J. (2006). Calibration Transfer Among Sensor Arrays Designed for Monitoring Volatile Organic Compounds in Indoor Air Quality. *IEEE Sensors Journal*, 6(6), 1638-1643. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2006.884558>

Zampolli, S., Elmi, I., Ahmed, F., Passini, M., Cardinali, G. C., Nicoletti, S., & Dori, L. (2004). An electronic nose based on solid state sensor arrays for low-cost indoor air quality monitoring applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 101(1-2), 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.02.024>

Los microorganismos en los bioaerosoles y la importancia de su estudio

Algunos organismos de tamaño muy pequeño, llamados microorganismos y que no podemos ver a simple vista pueden provocar enfermedades como la gripa, la tos, daños en la piel, daños en los ojos, ya que estos son transportados de un lugar a otro por el aire a grandes distancias. Estos microorganismos varían su cantidad debido a las condiciones del ambiente como la temperatura, el aire, la radiación solar, y la lluvia. Estos microorganismos pueden estar presentes en el interior de las casas y en el exterior, y si no hay una adecuada ventilación en los interiores se favorece a que haya una mayor cantidad de estos y afecten más a nuestra salud, por lo que es importante tener ventilados los lugares en donde estamos. En épocas de frío el cuerpo se vuelve más sensible a enfermarse y los microorganismos que son transportados por el aire aprovechan para causar enfermedades, por lo que es necesario un mayor cuidado en el invierno para disminuir las enfermedades respiratorias.

Los seres humanos en los últimos siglos han cambiado preponderantemente su estilo de vida, pues pasaron de los espacios rurales a las ciudades, devastando muchas zonas naturales para satisfacer las necesidades de las grandes urbes. Las ciudades brindan muchos beneficios a los seres humanos, entre los que se encuentran empleo, educación y variedad cultural, pero alteran la interacción con la naturaleza (Harari, 2014). Todo esto conlleva a una mayor exposición a microorganismos que son transportados a través del aire (microbiomas); este tema todavía está poco estudiado (Flies *et al.*, 2020).

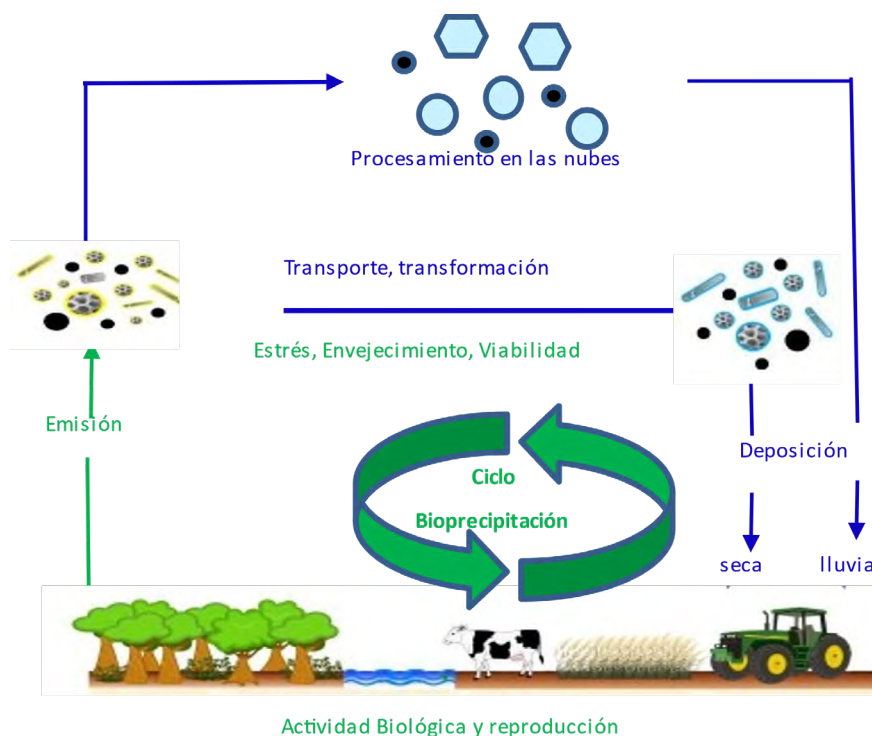
El microbioma aéreo es de importancia para la salud humana debido a que una gran cantidad de microorganismos tienen una amplia distribución a nivel mundial. Los estudios generalmente se enfocan en bacterias, hongos, virus y arqueas. El contacto con los microorganismos aerotransportados es continuo, considerando que las zonas expuestas del cuerpo humano son la piel, superficies bucales, nasales y respiratorias (La *et al.*, 2022).

Dentro de las principales consecuencias que causan los microorganismos aerotransportados están enfermedades alérgicas y respiratorias; por ejemplo, las bacterias y hongos causan infecciones, mientras que el polen y los hongos desencadenan asma y rinitis alérgica (Flies *et al.*, 2020; La *et al.*, 2022).

El impacto que tiene la urbanización en la generación de microorganismos aerotransportados es importante debido al entorno en el que las personas se encuentran: cerca de tiraderos a cielo abierto, ríos y suelos contaminados, zonas de cultivo regadas con aguas residuales sin tratamiento, entre otros. Además, la concentración del aerobioma afecta a la salud (Flies *et al.*, 2020; Karra y Katsivela, 2007).

En un gran número de investigaciones se estudia la composición y las características microbianas del aire, partiendo de la distribución microbiana, características microbianas del ambiente, así como el macro y microambiente, indispensables para entender el comportamiento de los microorganismos aerotransportados. La medición de la biodiversidad microbiana en los microorganismos aerotransportados no es algo fácil de realizar, aunque es de suma importancia dedicar esfuerzos para este aspecto, ya que si se logra comprender cómo se ve incrementada la biodiversidad y cómo se distribuye a través de las diversas fuentes de generación y en los diferentes climas, se podría tratar de disminuir esta biodiversidad microbiana, controlando los aspectos iniciales e importantes de su generación, lo que contribuiría a una disminución de las enfermedades respiratorias antes mencionadas (Figura 1) (Liang *et al.*, 2020; Zhai *et al.*, 2018).

Figura 1. Generación y transporte de los bioaerosoles.



Cápsula # 1

Los bioaerosoles con los que los seres vivos están en contacto de manera cotidiana están formados por bacterias, hifas y esporas de hongos, virus, polen de plantas, algas, así como excreciones o fragmentos de células; estos componentes constituyen del 30 al 80% de las partículas en el aire ambiente.

El desarrollo de la secuenciación del ADN mediante metagenómica ha mejorado la capacidad de explicar la biodiversidad microbiana de los microorganismos aerotransportados que son más complejos que la medición de microorganismos de los organismos vivos, superficies, agua y suelo, lo que resulta un aspecto fundamental en su investigación. Estos estudios de metagenómica mejoran la capacidad de resolución del estudio de la biodiversidad, haciendo que las investigaciones sean de vanguardia y holísticas en la caracterización de los microbiomas. Debido a la complejidad del estudio y a los factores que ayudan a la generación de bioaerosoles, se debe estudiar la concentración del material particulado (*PM1*, *PM2.5*, *PM10*), así como de compuestos químicos que pueden favorecer la presencia y conservación de los bioaerosoles por una mayor cantidad de tiempo. La generación, permanencia y depositación de los bioaerosoles dentro del aire dependerá de diversos factores ambientales de importancia, como son la temperatura, la precipitación (lluvia, granizo y nieve), la radiación solar, incluida la cantidad de luz ultravioleta (UV) a la que están expuestos los seres vivos, la formación de núcleos que incluyen a los microorganismos, tomando como base el material particulado que ayuda a mantener y transportar una mayor cantidad de microorganismo, a la velocidad del viento, que ayuda a su transportación por grandes distancias, y la cantidad de humedad relativa del ambiente, ya que una mayor cantidad de humedad favorece a un mantenimiento prolongado de los microorganismos, y, finalmente, la cantidad de oxígeno (Karra y Katsivela, 2007; Zhai *et al.*, 2018).

Uno de los principales grupos de estudio corresponde a las bacterias. Estas se encuentran ampliamente distribuidas en la atmósfera y oscilan entre 10 y 10^7 células m^{-3} estimadas por métodos con medios de cultivo, biología molecular y por el método de estimación rápida. Gran parte del estudio de las bacterias corresponde a las bacterias Gram negativas, que tienen la capacidad de producir endotoxinas que son liberadas al medio y que pueden provocar diversas infecciones y toxicidad cuando se encuentran en grandes concentraciones (Zhai *et al.*, 2018).

Las bacterias normalmente no se encuentran solas, sino que se adhieren al material particulado, formando núcleos que logran sobrevivir con nutrientes obtenidos de las nubes, del agua y de las propias partículas, hasta su depositación, dependiendo de las condiciones climatológicas (La *et al.*, 2022; Zhai *et al.*, 2018). La biodiversidad bacteriana es amplia y se han encontrado diversos géneros bacterianos dominantes, entre los que destacan *Streptophyta*, *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Kocuria*, *Staphylococcus*, *Sarina*, *Sphingomonas*, *Chryseobacterium*, *Sejonia*, *Vibrio*, *Micrococcus*, etc. (Zhai *et al.*, 2018).

La concentración bacteriana, la diversidad, la distribución de tamaño y las especies predominantes cambiarán de acuerdo con la variación temporal y espacial. El cambio temporal incluye principalmente el cambio diario y el cambio estacional, mientras que el cambio espacial generalmente se refiere a la exploración de la fuente microbiana y las diferentes características de los microorganismos aerotransportados en regiones distintas. En la mayoría de los casos, la abundancia microbiana cambia durante el día, pues las concentraciones máximas normalmente aparecen entre las 7:00 y las 9:00 h, y entre las 17:00 y las 18:00 h, mientras que las mínimas entre las 13:00 y las 14:00 h. Las bacterias aumentan de nivel durante el día en comparación con la noche (Figura 2) (Zhai *et al.*, 2018).

Otro grupo de importancia de estudio son los hongos ubicuos. En comparación con las bacterias, el alérgeno fúngico es uno de los más predominantes. La exposición a hongos se ha relacionado más estrechamente con la sensibilización alérgica y los síntomas de alergia y asma. Dentro de las especies dominantes de los hongos se encuentran *Cladosporium*, *Aspergillus* y *Penicillium*. Estos géneros comunes poseen diferentes grados de patogenicidad y anafilaxia (Figura 3) (Flies *et al.*, 2020; Zhai *et al.*, 2018).

Figura 2. Bioaerosoles de diversas especies de bacterias (Zhai *et al.*, 2018).



La distribución de los hongos se ve afectada por la variación temporal y espacial, dependiendo de la región: las diferentes fuentes, las condiciones meteorológicas, tipos de uso del suelo y las actividades antropogénicas (Flies *et al.*, 2020; Zhai *et al.*, 2018).

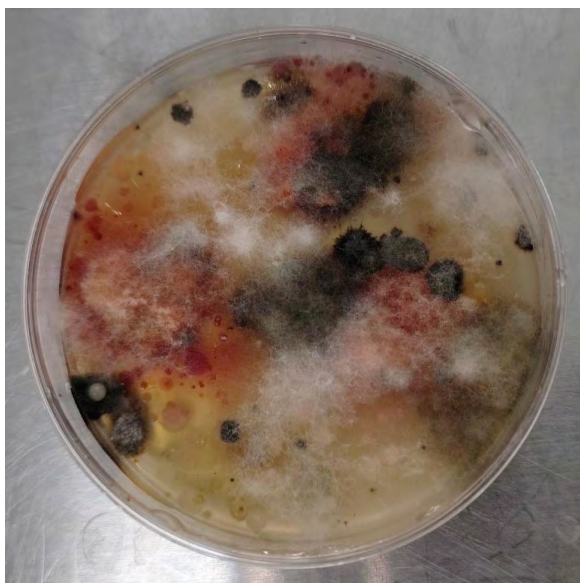


Figura 3. Bioaerosoles de diversas especies de hongos (Zhai *et al.*, 2018).

Cápsula # 2

Entre los principales riesgos para la salud humana por la inhalación de bacterias y hongos, están las infecciones respiratorias y el deterioro de la función pulmonar.

En una menor proporción, los virus y las arqueas se encuentran dentro de los microorganismos aerotransportados, siendo entre el 1 y el 10 % como máximo, pero algunos poseen una elevada patogenicidad en bajas concentraciones, por lo que también deben tomarse en consideración. Las enfermedades virales infecciosas son un problema para la salud humana, como se manifestó con la más reciente pandemia por el SARS-CoV-2, pero también afectan considerablemente a la industria ganadera en todo el mundo, debido a que las enfermedades transmitidas por el aire son muy difíciles de manejar con las condiciones normales de bioseguridad. Todo lo anterior ratifica que es fundamental el estudio de la aeromicrobiología (La *et al.*, 2022; Zhai *et al.*, 2018).

Las arqueas representan aproximadamente el 10 % de los procariontes, provienen de ambientes extremos, pero su fuente fundamental es el suelo, aunque también se encuentran en algunos otros hábitats como agua dulce, sedimentos de agua dulce, sedimentos estuarinos, agua marina, sedimentos marinos y sistemas geotérmicos. Se ha estudiado muy poco acerca de la distribución de área de estos microorganismos y sus afectaciones a la salud, por lo que es indispensable incluirlas en los sistemas de monitoreo de los microorganismos aerotransportados (La *et al.*, 2022; Zhai *et al.*, 2018).

Referencias

- Flies, E. J., Clarke, L. J., Brook, B. W., y Jones, P. (2020). Urbanisation reduces the abundance and diversity of airborne microbes - but what does that mean for our health? A systematic review. *Science of The Total Environment*, 738, 140337. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140337>
- Harari, Y. N. (2014). *Sapiens. De animales a dioses: Una breve historia de la humanidad* (Traducción, pp. 455-456). Debate.
- Karra, S., y Katsivela, E. (2007). Microorganisms in bioaerosol emissions from wastewater treatment plants during summer at a Mediterranean site. *Water Research*, 41(6), 1355-1365. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.12.014>
- La, A., Zhang, Q., Cicek, N., y Coombs, K. M. (2022). Current understanding of the airborne transmission of important viral animal pathogens in spreading disease. *Biosystems Engineering*, 224, 92-117. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.09.013>
- Liang, Z., Yu, Y., Ye, Z., Li, G., Wang, W., y An, T. (2020). Pollution profiles of antibiotic resistance genes associated with airborne opportunistic pathogens from typical area, Pearl River Estuary and their exposure risk to human. *Environment International*, 143, 105934. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105934>
- Zhai, Y., Li, X., Wang, T., Wang, B., Li, C., y Zeng, G. (2018). A review on airborne microorganisms in particulate matters: Composition, characteristics and influence factors. *Environment International*, 113, 74-90. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.01.007>

Las microalgas en los bioaerosoles atmosféricos. Repercusión en la salud

¿Alguna vez has oído hablar de las microalgas? Son seres muy pequeños, que flotan en el aire y pueden causar reacciones alérgicas en algunas personas. ¡Por eso es importante conocer más sobre ellas! Las microalgas son como plantas muy chiquititas que pueden vivir en el agua o en el aire. Algunas de ellas se alimentan solo de la luz del sol y el aire, ¡como los superhéroes de la naturaleza! Otras, en cambio, necesitan comer cosas orgánicas, ¡como tú y yo!

Para estudiar a las microalgas, los científicos necesitan recolectar muestras del aire y del agua. Después las ponen en un laboratorio para ver cómo crecen y qué necesitan para vivir. Así pueden entender mejor su importancia en la naturaleza.

¡Recuerda, las microalgas son pequeñas pero poderosas! Ayudan a producir la materia orgánica y son muy importantes para la cadena alimenticia, aunque algunas nos pueden enfermar.

Los bioaerosoles son un grupo diverso en el que se pueden distinguir restos de células vegetales, polen, hongos, microalgas, cianobacterias, bacterias y virus (Genitsaris *et al.*, 2011; Urbano *et al.*, 2011) culture-dependent (i.e. agar plates. Sin embargo, la cantidad de cianobacterias y microalgas en la atmósfera puede ser menor que la de otras partículas, por ejemplo, bacterias o virus, de ahí el nivel insuficiente de conocimiento científico sobre su presencia en la atmósfera (Sharma *et al.*, 2006).

Las microalgas resuspendidas en el aire pueden ser una fuente potencial de alérgenos en los bioaerosoles. Los alérgenos son proteínas que pueden causar una reacción alérgica en personas sensibles. Las microalgas son una fuente común de alérgenos en el aire debido a su capacidad para liberar esporas y fragmentos celulares que pueden dispersarse en el aire (Tesson *et al.*, 2016)

Las microalgas son organismos unicelulares eucariotas fotosintéticos (2-200 μm), que pueden crecer de modo autotrófico, heterotrófico, entre otras clasificaciones (Tabla 1). En general son altamente eficientes en la fijación del CO_2 y utilización de la energía solar para producir biomasa (Figura 1), con una eficiencia hasta cuatro veces superior a la de las plantas. La importancia de las microalgas radica en su papel como productoras primarias de la cadena trófica, que las convierte en las primeras productoras de materia orgánica. (Fogg y Thake, 1987).

Figura 1: Proceso de fotosíntesis realizado por las microalgas.

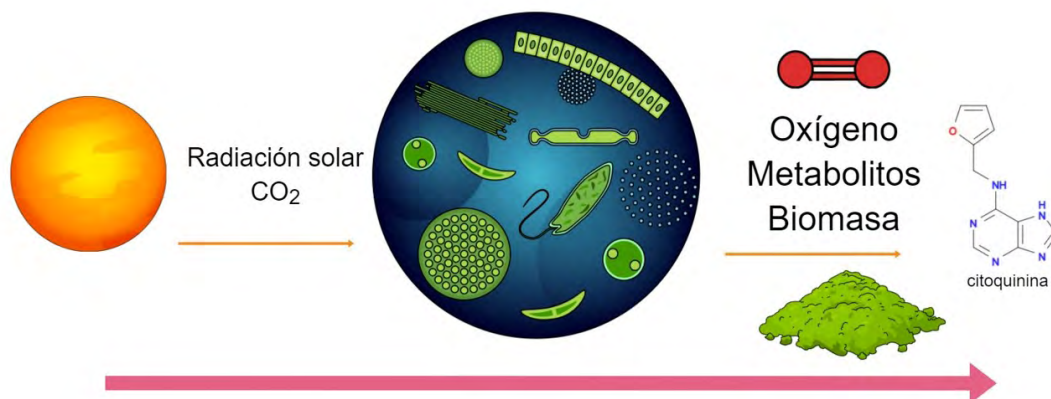


Tabla 1 Clasificación de microalgas por sus requerimientos de crecimiento.

Clasificación de acuerdo con su fuente de energía/carbono	Características
Fotoautótrofa	Las algas obtienen la energía del sol y el carbono de compuestos inorgánicos.
Fotoheterótrofa	Obtienen la energía del sol y emplean compuestos orgánicos como fuente de carbono.
Mixotrófica	Muchas algas son capaces de crecer bajo procesos tanto autótrofos como heterótrofos, de manera que la fuente de energía es tanto la luz como la materia orgánica. El carbono lo obtienen de compuestos orgánicos y del CO_2 . Algunas de estas algas son <i>Spirulina platensis</i> o <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> .
Heterótrofa:	Los compuestos orgánicos proporcionan tanto la energía como la fuente de carbono. Es decir, existen algas que pueden desarrollarse bajo ausencia de luz, como por ejemplo <i>Chlorella protothecoides</i> .

Es importante conocer las condiciones óptimas y los límites de tolerancia de una microalga para todos o el mayor número de parámetros, tanto individualmente como para el conjunto de todos ellos. En el cultivo masivo de microalgas el rendimiento alcanzado depende tanto de la concentración de células en el cultivo como del grado en que las células pueden desarrollar su potencial de crecimiento. Por tanto, para conseguir un cul-

tivo de microalgas en crecimiento activo es necesario un inóculo viable, un suministro mínimo de nutrientes y microelementos y adecuadas condiciones químicas y físicas: luz, aireación, temperatura, salinidad y energía (Cañizares *et al.*, 1994).

Cápsula # 1

Las microalgas son, en general, organismos fotoautótrofos, es decir, obtienen la energía de la luz proveniente del sol y se desarrollan a partir de materia inorgánica. Sin embargo, algunas especies son capaces de crecer empleando materia orgánica como fuente de energía o de carbono.

El muestreo y recolección de microalgas propuesto por Rosas y colaboradores, y Bernstein y Safferman (Bernstein y Safferman, 1970; Rosas *et al.*, 1989), establecen puntos que serán muestreados en periodos de lluvias y estiaje, donde se registrará el volumen total de aire muestreado y se almacenarán en 100 ml de BBM (Bold's basal medium), posteriormente se tomarán alícuotas que serán filtradas por filtros Millipore de 0.45 μm , dejando cultivar por 12 días en medio agar modificado para algas a una temperatura de 20-30°C con un fotoperiodo de 12 horas. Al finalizar, se harán conteos, visualizaciones y aislamiento de los organismos como se ilustra en la Figura 2. A su vez, todo muestreo se complementará con muestras del cuerpo de agua más cercano para su caracterización fisicoquímica y cultivo de microalgas y cianobacterias para la correlación de organismos suspendidos en el aire y posibles fuentes de origen o trampas.

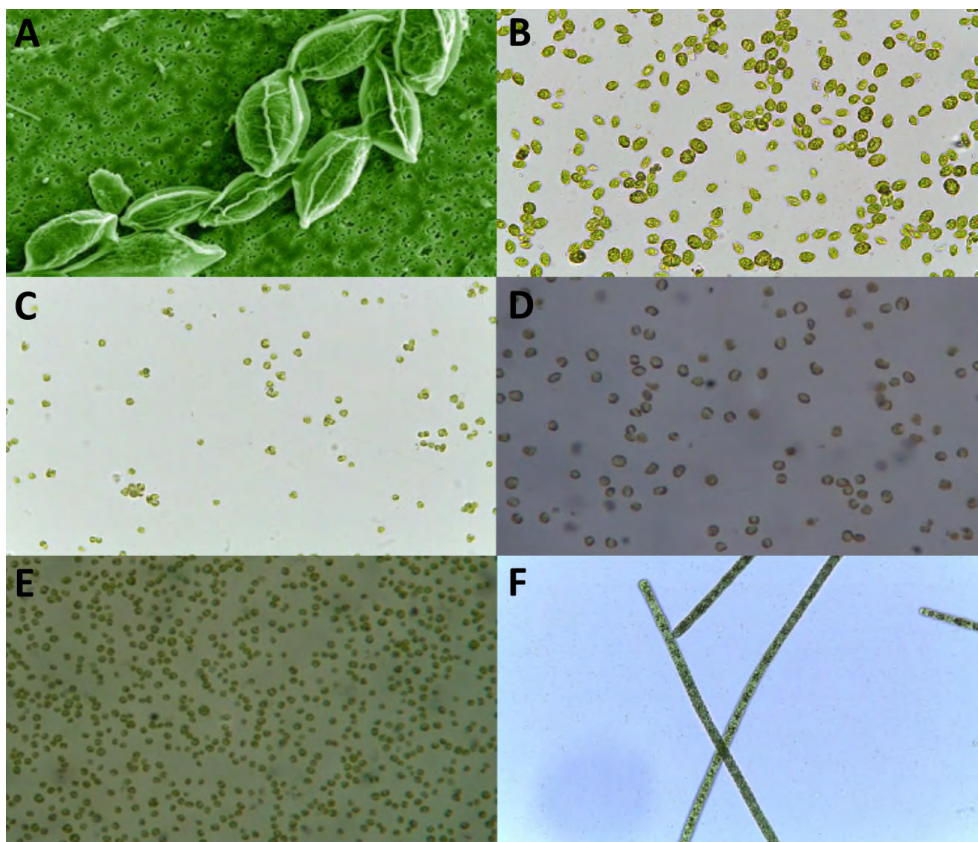
A través de un análisis bibliográfico se identificarán aquellos taxones que están reportados como agentes tóxicos para los humanos y se establecerá aquellos que requieren atención para su determinación, este proceso garantiza el correcto manejo de las muestras y la confiabilidad de los resultados obtenidos y dicha información es útil para los investigadores que desean estudiar los diferentes grupos de microorganismos y comprender sus características, ya que puede ayudar a determinar la presencia o ausencia de microalgas patógenas.

Figura 2. Muestreo y recolección de microalgas.



Las microalgas se clasifican en procariotas y eucariotas (Graham y Wilcox, 2000): Dentro de las procariotas tenemos *Cianofíceas* y *Prochlorófitas*. En el grupo de las eucariotas nos encontramos: *Clorofíceas*, *Crisofíceas*, *Haptofíceas*, *Bacilarofíceas*, *Pirrofíceas*, *Criptofíceas* y *Euglenofíceas*. La composición de las microalgas (contenido en lípidos, carbohidratos y proteínas) varía en función de la especie considerada y, dentro de una misma especie, varía según el sistema y condiciones de cultivo. En general, las cianobacterias tienen un contenido en lípidos de hasta 20 %, mientras que en las algas Prochlorófitas oscila entre un 20 y 50 % en peso seco. En la Figura 3 se muestran diferentes imágenes de microalgas al microscopio, con distinto tipo de color, forma, etc.

Figura 3: Vistas al microscopio de distintas microalgas producidas en la Estación Experimental Cajamar Las Palmerillas: A y B. *Scenedesmus almeriensis* (medio dulce); C. *Chlorella vulgaris* (medio dulce); D. *Isochrysis galbana* (medio salino); E. *Nannochloropsis gaditana* (medio salino); F. *Spirulina* (medio dulce).



Cápsula # 2

Las microalgas son organismos fotosintéticos que se encuentran en el agua y en el suelo. Aunque generalmente se consideran inofensivos, algunas especies de microalgas pueden liberar sustancias tóxicas al medio ambiente. Estas sustancias pueden ser transportadas por el aire en forma de bioaerosoles, que son partículas en suspensión en el aire compuestas por material biológico.

El papel ambiental de las cianobacterias y microalgas transportadas por el aire solo se comprende parcialmente. Mientras están presentes en el aire, las cianobacterias y las microalgas pueden contribuir a la nucleación de hielo y la formación de gotas de nubes. Las cianobacterias y las microalgas también pueden afectar la salud humana (Bernstein y Safferman, 1970; Genitsaris *et al.*, 2011; K. A. Wiśniewska *et al.*, 2019). Dependiendo de su tamaño, las cianobacterias y las microalgas transportadas por el aire pueden ser inhaladas por los humanos y asentarse en diferentes partes del sistema respiratorio, lo que lleva a la formación o intensificación de numerosas enfermedades y dolencias, por ejemplo, alergias, dermatitis y rinitis (Figura 4) (Lewandowska *et al.*, 2017). Los fragmentos celulares pueden contener proteínas alergénicas y ser inhalados, lo que puede provocar síntomas alérgicos en personas sensibles. Estos fragmentos celulares pueden contener proteínas alergénicas y ser inhalados, lo que puede provocar síntomas alérgicos en personas sensibles (Tesson *et al.*, 2016)

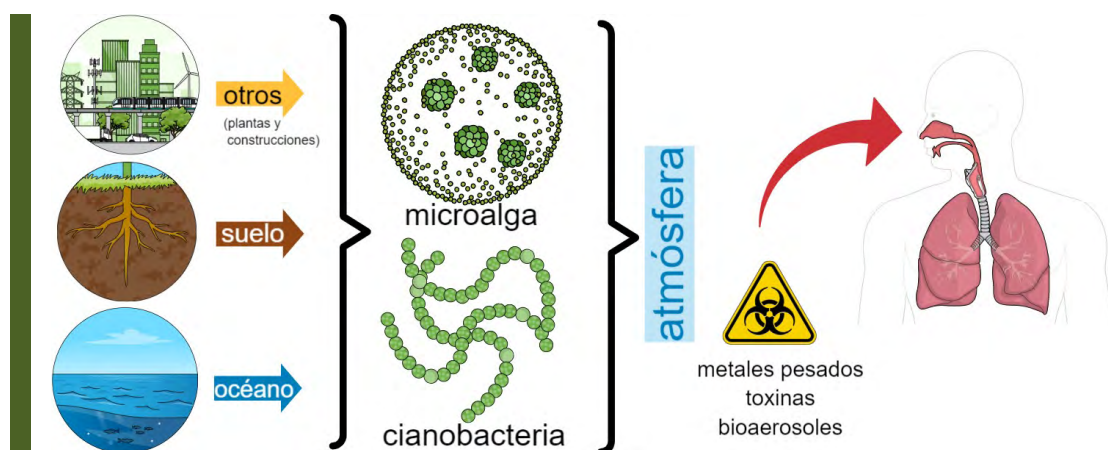


Figura 4. Las microalgas transportadas por el aire pueden ser inhaladas por los humanos.

En este sentido, los microorganismos dañinos pueden representar entre el 13% y el 71% de los taxones muestreados en el aire (Tiberg, 1987), por lo que es importante considerar la presencia de microalgas resuspendidas en el aire al evaluar la calidad del aire y de este modo, ayudar a prevenir problemas de salud relacionados con la inhalación de alérgenos (Kinga A. Wiśniewska *et al.*, 2022). Además, se ha detectado la presencia de diversas especies de microalgas en el polvo doméstico, lo que sugiere que estas microalgas pueden ser una fuente potencial de alérgenos en el aire interior (Lewandowska *et al.*, 2017; Kinga A. Wiśniewska *et al.*, 2022). Al mismo tiempo Sharma y Singh (Sharma y Singh, 2008) encontraron una diversidad significativa de algas en el polvo urbano de la ciudad y también un patrón temporal estacional en la presencia de estas algas, estableciendo al polvo de la ciudad como una fuente constante de microalgas con potencial alergénico.

Cápsula # 3

Los bioaerosoles atmosféricos que contienen microalgas pueden tener una repercusión negativa en la salud humana. Cuando se inhalan, las partículas pueden provocar una respuesta inflamatoria en las vías respiratorias, lo que puede dar lugar a síntomas como tos, dificultad para respirar y dolor de cabeza. Además, las toxinas liberadas por algunas especies de microalgas pueden causar problemas gastrointestinales y neurológicos.

Sharma, junto con sus colaboradores (Sharma Ghimire *et al.*, 2019), mencionan métodos convencionales como la microscopía y el cultivo bacteriano y técnicas emergentes basadas en la genómica, la proteómica y la metagenómica, los cuales ofrecen una mayor precisión y una amplia capacidad de detección de bioaerosoles, así como información detallada sobre su diversidad, composición y estructura.

La identificación y monitoreo de microalgas resuspendidas en el aire es un reto. Primero, debido a la diversidad de ambientes; rurales, urbanos y áreas costeras y segundo, porque no existen protocolos y técnicas específicas o eficientes para la detección y cuantificación de estos microorganismos. (Sahu y Tangutur, 2015). Sahu también menciona que existen pocas metodologías eficientes y representativas para el muestreo e identificación de las microalgas resuspendidas en bioaerosoles, en las cuales destacan la captura

de partículas en filtros, la recolección en láminas, la captura en plataformas electrónicas y la recolección en líquidos, mientras que para la identificación concuerda que técnicas moleculares, espectrofotometría y fluorescencia son técnicas emergentes que deben combinarse con las diversas metodologías de muestreo y la identificación clásica como la microscopía y cultivo.

Cápsula #4

Los bioaerosoles que contienen microalgas pueden ser transportados a grandes distancias por los vientos, lo que significa que incluso las personas que viven lejos del agua o la costa pueden estar expuestas a estos contaminantes atmosféricos. Por esta razón, es importante que se realicen estudios para evaluar la calidad del aire y los posibles efectos sobre la salud humana.

El centro de México, en particular la cuenca del Alto Atoyac con el área Metropolitana de Puebla y Tlaxcala está en constante interacción con contaminantes emergentes de diferentes orígenes, en este caso los bioaerosoles son un cúmulo de partículas orgánicas e inorgánicas que están en contacto directo con las mucosas humanas al respirar el aire, lo que aporta agentes tóxicos y de importancia médica que pueden ser considerados como agentes causales de morbilidades de la región. Por lo tanto, la atención a esta problemática es multifactorial y debe ser enfrentada entre agencias gubernamentales, entidades públicas, privadas, organizaciones no gubernamentales, entre otras, que formulen estrategias conjuntas para su resolución.

Referencias

- Bernstein, I. L., y Safferman, R. S. (1970). Viable Algae in House Dust. *Nature*, 227(5260), 851-852. <https://doi.org/10.1038/227851a0>
- Cañizares, R. O., Rivas, L., Montes, C., Domínguez, A. R., Travieso, L., y Benitez, F. (1994). Aerated swine-wastewater treatment with K-carrageenan-immobilized *Spirulina maxima*. *Bioresource Technology*, 47(1), 89-91. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)90035-3](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)90035-3)
- Fogg, G. E., y Thake, B. (1987). *Algal cultures and phytoplankton ecology* (Third). University of Wisconsin Press. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US8918226>
- Genitsaris, S., Kormas, K. A., y Moustaka-Gouni, M. (2011). Airborne Algae and Cyanobacteria Occurrence and Related Health Effects. *Frontiers in Bioscience*, 3(2), 772-787. <https://doi.org/10.2741/e285>
- Graham, L. E., y Wilcox, L. W. (2000). Introduction to the Algae. En *Algae* (pp. 1-20). Prentice Hall.
- Lewandowska, A. U., Śliwińska-Wilczewska, S., y Woźniczka, D. (2017). Identification of cyanobacteria and microalgae in aerosols of various sizes in the air over the Southern Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 125(1-2), 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.07.064>
- Rosas, I., Roy-Ocotla, G., y Mosiño, P. (1989). Meteorological effects on variation of airborne algae in Mexico. *International Journal of Biometeorology*, 33(3), 173-179. <https://doi.org/10.1007/BF01084602>
- Sahu, N., y Tangutur, A. D. (2015). Airborne algae: overview of the current status and its implications on the environment. *Aerobiologia*, 31(1), 89-97. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9349-z>
- Sharma Ghimire, P., Tripathi, L., Chen, P., y Kang, S. (2019). Linking the conventional and emerging detection techniques for ambient bioaerosols: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18(3), 495-523. <https://doi.org/10.1007/s11157-019-09506-z>
- Sharma, N. K., Rai, A. K., y Singh, S. (2006). Meteorological Factors Affecting the Diversity of Airborne Algae in an Urban Atmosphere. *Ecography*, 29(5), 776-772. <https://www.jstor.org/stable/30243166>

- Sharma, N. K., y Singh, S. (2008). Algae of settle city dust: Diversity and temporal pattern. *Indian J. Aerobiol.*, 21(1), 36-41.
- Tesson, S. V. M., Skjøth, C. A., Šantl-Temkiv, T., y Löndahl, J. (2016). Airborne Microalgae: Insights, Opportunities, and Challenges. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(7), 1978-1991. <https://doi.org/10.1128/AEM.03333-15>
- Tiberg, E. (1987). *Microalgae as Aeroplankton and Allergens* (pp. 171-173). https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7491-5_30
- Urbano, R., Palenik, B., Gaston, C. J., y Prather, K. A. (2011). Detection and phylogenetic analysis of coastal bioaerosols using culture dependent and independent techniques. *Biogeosciences*, 8(2), 301-309. <https://doi.org/10.5194/bg-8-301-2011>
- Wiśniewska, K. A., Lewandowska, A. U., y Śliwińska-Wilczewska, S. (2019). The importance of cyanobacteria and microalgae present in aerosols to human health and the environment – Review study. *Environment International*, 131, 104964. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104964>
- Wiśniewska, Kinga A., Śliwińska-Wilczewska, S., y Lewandowska, A. U. (2022). Airborne microalgal and cyanobacterial diversity and composition during rain events in the southern Baltic Sea region. *Scientific Reports*, 12(1), 2029. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06107-9>

Estudio del aire y los bioaerosoles en las inmediaciones de ríos contaminados

En las secciones anteriores aprendimos que hay contaminantes en el medio ambiente, desde compuestos comunes en nuestro día a día, hasta material biológico. También hemos aprendido que hay métodos para detectarlos y para determinar la cantidad en la que se encuentran. Todo este conocimiento nos ayudará a entender el contenido de esta sección.

Estamos seguros que, si vives en Puebla o la has visitado, has escuchado hablar del Río Atoyac. Y probablemente hasta has tenido que aguantar la respiración al pasar junto a él debido su olor. Ese olor es producido por sustancias que están en el río y no deberían estar en él, pero también significa que muchos de los contaminantes que están en el río, forman parte de la contaminación del aire en la atmósfera circundante de este cuerpo de agua. En esta sección daremos evidencia de que la contaminación de los ríos está influyendo negativamente en la calidad del aire de sus inmediaciones.

En esta sección se presentan los hallazgos del análisis del MP colectado del aire en las inmediaciones del río Atoyac y del río Nexapa: una muestra de aire de referencia y dos muestras de agua obtenidas de estos ríos. Es importante mencionar que se han hecho pocos estudios para relacionar la calidad de aire en las inmediaciones de ríos contaminados con la presencia de contaminantes en los mismos, haciendo evidente la necesidad de ampliar este estudio preliminar para obtener resultados que permitan mejorar la estadística y, en consecuencia, los resultados y conclusiones derivados.

A pesar de ello, los resultados aquí presentados ayudan a obtener una primera visión del estado actual de los ríos Atoyac y Nexapa, y de la calidad del aire a sus alrededores. También se hace evidente la importancia de mejorar la calidad del agua para ayudar al mejoramiento de la calidad del aire y, en consecuencia, de la calidad de vida de las personas que viven en las cercanías de los ríos. Esto a su vez muestra la importancia de respetar el límite federal de los mismos.

Introducción

La contaminación ambiental es llamada así porque la presencia de contaminantes afecta al suelo, a la atmósfera y a los cuerpos de agua. Sin embargo, sus efectos no se ven solamente en el ambiente, sino también en la salud humana y en los demás organismos que habitan en él. A lo largo de este documento se ha podido apreciar la diversidad de contaminantes que afectan al entorno, sobre todo al aire que se respira. Esta complejidad dificulta su estudio y la viabilidad de obtener una solución que sea efectiva para eliminar la presencia de todos estos contaminantes, tanto de fuentes naturales como antropogénicas.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha reportado que alrededor de 3.2 millones de muertes son producto de la contaminación del aire producida por la combustión incompleta al cocinar con combustibles sólidos o queroseno en el interior de los hogares; estas ascienden a 6.7 millones de muertes prematuras cuando la calidad del aire exterior también es mala (OMS, 2022). Además, se sabe que algunos de los contaminantes más peligrosos para la salud (como los HAP y contaminantes orgánicos persistentes) pueden unirse al MP y, en consecuencia, ser transportados largas distancias (Ukaogo *et al.*, 2020). Esta situación, entre otras, hace que la contaminación del aire sea uno de los problemas más apremiantes para resolver.

Desde hace muchos años se sabe que los cuerpos de agua contaminados pueden producir aerosoles que pueden ser transportados por el aire; además, cuando contienen material biológico (fragmentos microscópicos de animales, plantas o microorganismos), son conocidos como bioaerosoles (Maldonado-Vega *et al.*, 2014). Debido al movimiento del agua, estos bioaerosoles pasan a formar parte del aire que se respira y pueden ser transportados a las inmediaciones de dichos cuerpos de agua, pudiendo llevar con ellos agentes patógenos viables que pueden representar un daño para la salud (Hickey y Reist, 1975). Lo mismo puede ocurrir con otro tipo de contaminantes que estén presentes en el agua, aunque esto último está poco documentado. A su vez, la contaminación del aire puede incidir en la contaminación de los cuerpos de agua (Ukaogo *et al.*, 2020), mediante el depósito de partículas a través de la lluvia o por el efecto de la gravedad sobre ellas.

Cápsula #1

La contaminación ambiental incluye la contaminación del aire, el suelo y el agua. Es un fenómeno complejo porque muchos de estos contaminantes pueden ser transportados entre los compartimentos ambientales. Al ser un fenómeno que involucra muchas variables, la dispersión de los contaminantes requiere todavía de investigación exhaustiva para esclarecer el impacto que tiene la calidad de los ríos y otros cuerpos de agua en la contaminación del aire que se respira y, en consecuencia, en la salud.

Sin embargo, la contaminación del agua es principalmente originada por fuentes naturales (suelos ricos en minerales y metales pesados) y fuentes antropogénicas (descargas de los hogares, de hospitales, productos de la industria ganadera y agroindustrial, de la producción de materiales de construcción, minería, entre otras). Como resultado, disminuyen las fuentes de agua potable y se deterioran los ecosistemas acuáticos, lo que repercute directa o indirectamente en la salud humana. Además, hay evidencia científica que demuestra que la contaminación de los ríos afecta no solo a los organismos acuáticos, sino a la biodiversidad del zooplancton y a la comunidad biológica en general (Xiong *et al.*, 2019). Así, la calidad del agua para la salud ambiental y de las comunidades (humanas y no humanas) que viven alrededor de cuerpos de agua es, entonces, un factor que debe ser tratado como prioritario a la hora de establecer políticas públicas relacionadas con la gestión de los recursos hídricos y recuperación ambiental.

En el territorio nacional se han realizado muchos estudios para evaluar la calidad del aire, del agua y de los suelos, muchos de ellos realizados en la Ciudad de México. Sin embargo, también existen trabajos que evalúan la calidad del aire de la ciudad de Puebla (Gallego-Hernández *et al.*, 2020; A. E. Navarro y Delgado Rodríguez, 2014; Osorio *et al.*, 2013) y la calidad del agua de los ríos Atoyac (A. E. Navarro *et al.*, 2017; Pérez Castresana *et al.*, 2018) y Nexapa (A. Navarro *et al.*, 2014). Algunos de estos estudios incluyen la evaluación del impacto de la contaminación en la salud humana (Mora *et al.*, 2021; Pérez Castresana *et al.*, 2019; Sánchez y Caraballo, 2015; Tovalín-Ahumada y Whitehead, 2007).

Materiales y métodos

El estudio se realizó a partir del muestreo del río Atoyac y el río Nexapa, así como del MP presente en su atmósfera o atmósfera circundante. Se eligieron los puntos mostrados en la Figura 1A. En la ciudad de Puebla se eligió como punto de muestreo un afluente del Atoyac cercano a la Universidad Politécnica Metropolitana de Puebla (UPMP, Punto 1 en la Figura 1B), desde donde se tomó la muestra de aire correspondiente (Punto 2 en la Figura 1B). En Izúcar de Matamoros se realizó el muestreo del Río Nexapa en el puente del Amo (Punto 3 de la Figura 1C), cerca del Instituto de Capacitación para el Trabajo del Estado de Puebla (ICATEP), desde donde se tomó la muestra de aire correspondiente (Punto 4 de la Figura 1C).

Todas las muestras de aire se tomaron durante 8 y 24 horas, en días consecutivos para el estudio microbiológico. Las muestras puntuales de agua se tomaron en botellas ámbar de 1 L y se agregó 1 mL de HCl para preservarlas. Tanto las muestras de agua como las de aire fueron almacenadas a -11 °C hasta su extracción.

El análisis de las muestras se realizó por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG/EM) en un equipo Clarus 680/SQ8T de Perkin Elmer. La metodología para la extracción, tanto de las muestras de aire como las de agua, puede consultarse en el Apéndice A. En este apéndice también se describe el programa cromatográfico utilizado y los criterios de identificación de los microcontaminantes orgánicos (MCO) presentes en el MP analizado.

La cuantificación de los contaminantes se realizó mediante la razón entre el área del pico del compuesto y el área del pico del estándar interno en cada muestra (A/A_{SI}). Con estas relaciones de área se hizo un procesamiento estadístico utilizando el *software* de análisis de datos Statistica versión 13.3 (Tibco Software Inc., 2017). Para la exploración multivariable se utilizó un análisis de factores con componentes principales con el método de extracción y rotación Varimax. También se incluye la metodología para el estudio microbiológico.

Figura 1. A: Mapa con los puntos de muestreo en la ciudad de Puebla e Izúcar de Matamoros. Mapas de los puntos de muestreo en B: UPMP, C: ICATEP y UTIM, y D: Parque Acuático San Carlos. 1 y 3 son los puntos de muestreo en el río Atoyac y el río Nexapa, respectivamente. Los puntos 2, 4 - 6 son los puntos de muestreo de aire.

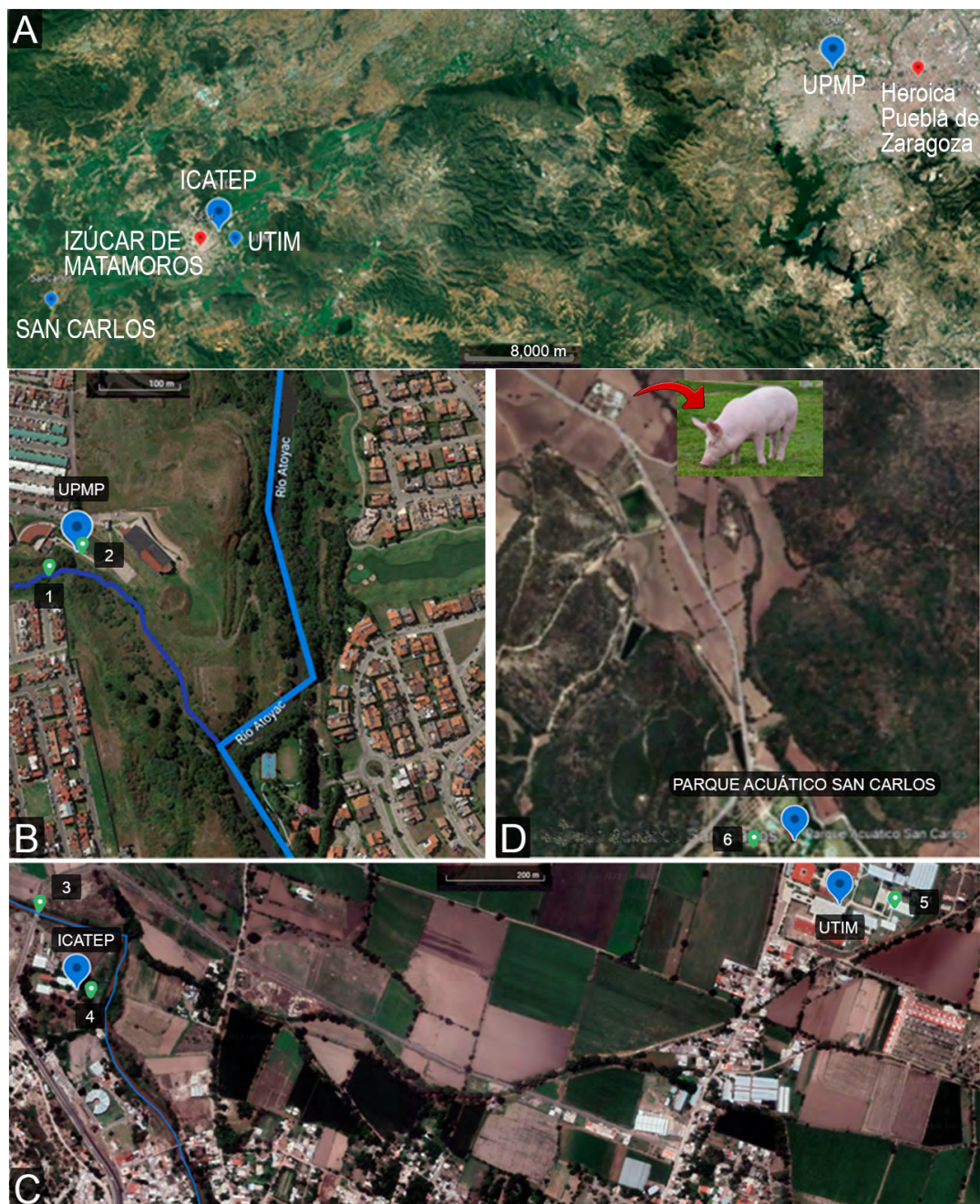


Tabla 1. Coordenadas de los puntos de muestreo del río Atoyac/Nexapa y de las muestras de aire colectadas en sus alrededores. NA = No aplicable, por tratarse de muestras de aire.

Sitio	Nomenclatura	Muestra	Descripción	Latitud	Longitud
1	Atoyac	Agua	Afluente Atoyac	19°00'07.0" N	98°15'05.0" O
2	UPMP	Aire	NA	19°00'07.1" N	98°15'06.1" O
3	Nexapa	Agua	Puente del Amo	18°37'01.4" N	98°28'01.1" O
4	ICATEP	Aire	NA	18°36'56.4" N	98°27'58.7" O
5	UTIM	Aire	Blanco1	18°37'01.0" N	98°27'01.6" O
6	San Carlos	Aire	Blanco2	18°29'39.6" N	98°30'31.1" O

Resultados y discusión

En la Figura 2 se muestran los cromatogramas de masa de corriente iónica total de las muestras de aire, incluyendo los puntos tomados como blancos (UTIM y San Carlos). Aunque se observan similitudes entre ellas y una gran cantidad de picos (MCO), la muestra tomada en la UPMP es la que tiene mayor intensidad de la señal (el doble que UTIM e ICATEP y 10 veces mayor que San Carlos), lo que refleja una mayor concentración de contaminantes en ese punto, con respecto del estándar interno.

Algo similar puede apreciarse en los cromatogramas de los ríos (Figura 3), donde la intensidad de las señales del río Atoyac es el doble de las observadas en el río Nexapa.

Esto es evidencia del origen común de algunos de los MCO estudiados, debido a la influencia que tiene el trasvase de las aguas del Atoyac a la altura del canal de Portezuelos. La clara disminución de la concentración de algunos contaminantes en el Nexapa se debe a la degradación producida durante el transporte de los MCO en el cauce del río hasta el punto de muestreo.

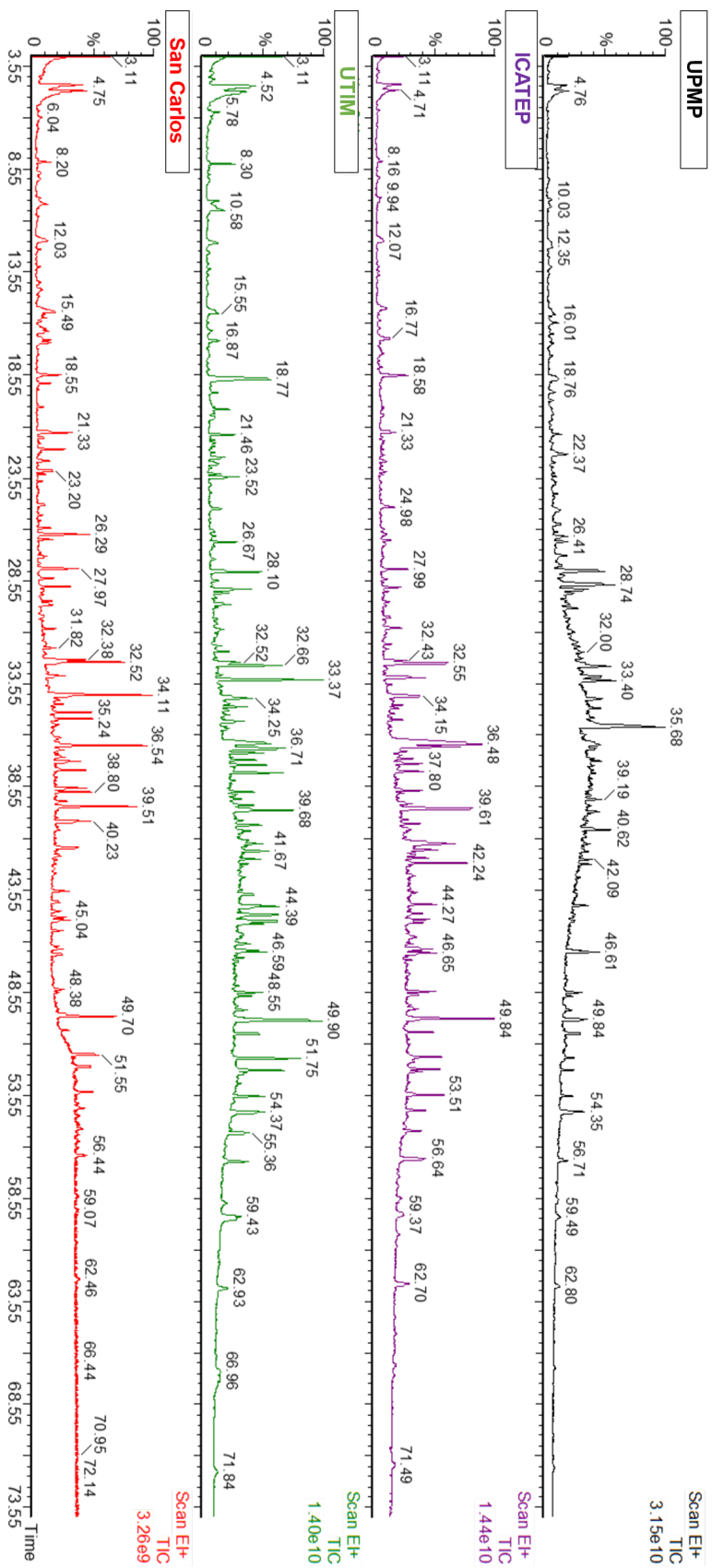


Figura 2. Cromatogramas de las muestras de aire tomadas en UPMP (negro), ICATEP (morado), UTIM (verde) y San Carlos (rojo).

A pesar de estas diferencias, tanto en las muestras de aire como en las de los ríos se identificaron alrededor de 250 compuestos, sin embargo, se excluyeron aquellos que no están identificados con certeza o los que son ubicuos en las muestras ambientales, como los ácidos grasos, sus ésteres y las n-parafinas. Esta selección de contaminantes reduce la lista hasta alrededor de 100 MCO.

Debido a que la valoración cuantitativa de todos los MCO encontrados requiere de una gran cantidad de costosos estándares de referencia y la elaboración de sus curvas de calibración correspondientes, se decidió hacer una evaluación semicuantitativa, tomando el área de los picos escogidos para cada compuesto y comparándola con el área del estándar interno en esa misma muestra (A/A_{SI}). Además, es importante señalar que este estudio preliminar únicamente es una aproximación a la complejidad del tema y que es necesario realizar estudios posteriores para considerar muestreos en diferentes épocas del año y más puntos de muestreo para poder evaluar el comportamiento espacio temporal de los MCO en el MP.

También se deben incluir puntos que evalúen el alcance de la contaminación cerca de los ríos mediante la toma de muestras, variando la distancia al río en cuestión.

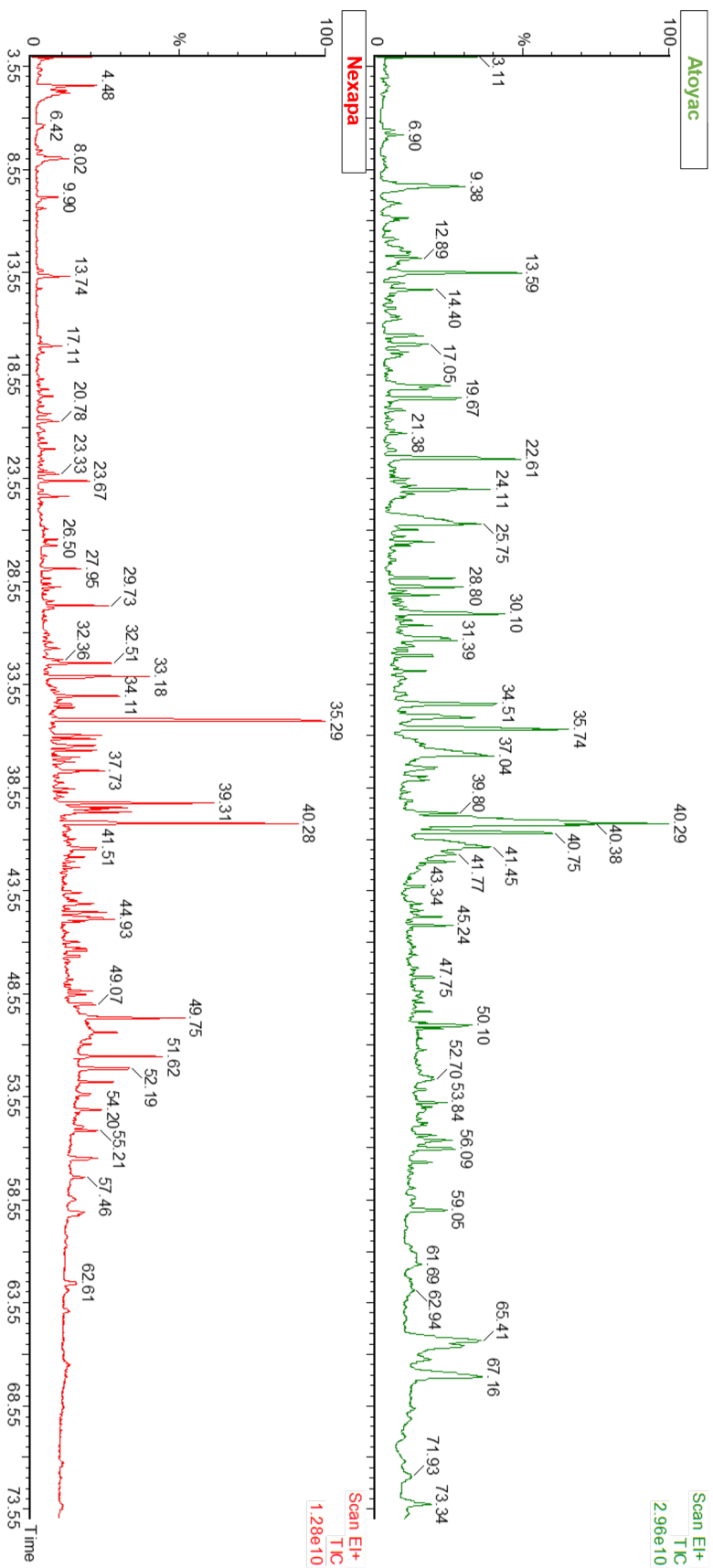


Figura 3. Cromatogramas de las muestras de agua tomadas en el río Atoyac (verde) y el río Nexapa (rojo).

Cápsula #2

Tanto en las muestras de los ríos como las de aire, se encontraron alrededor de 100 compuestos cuya posible fuente es la interacción del ser humano con el ambiente. Sin embargo, la presencia de estos microcontaminantes orgánicos o MCO en el río no explica, de forma absoluta, su presencia en el aire.

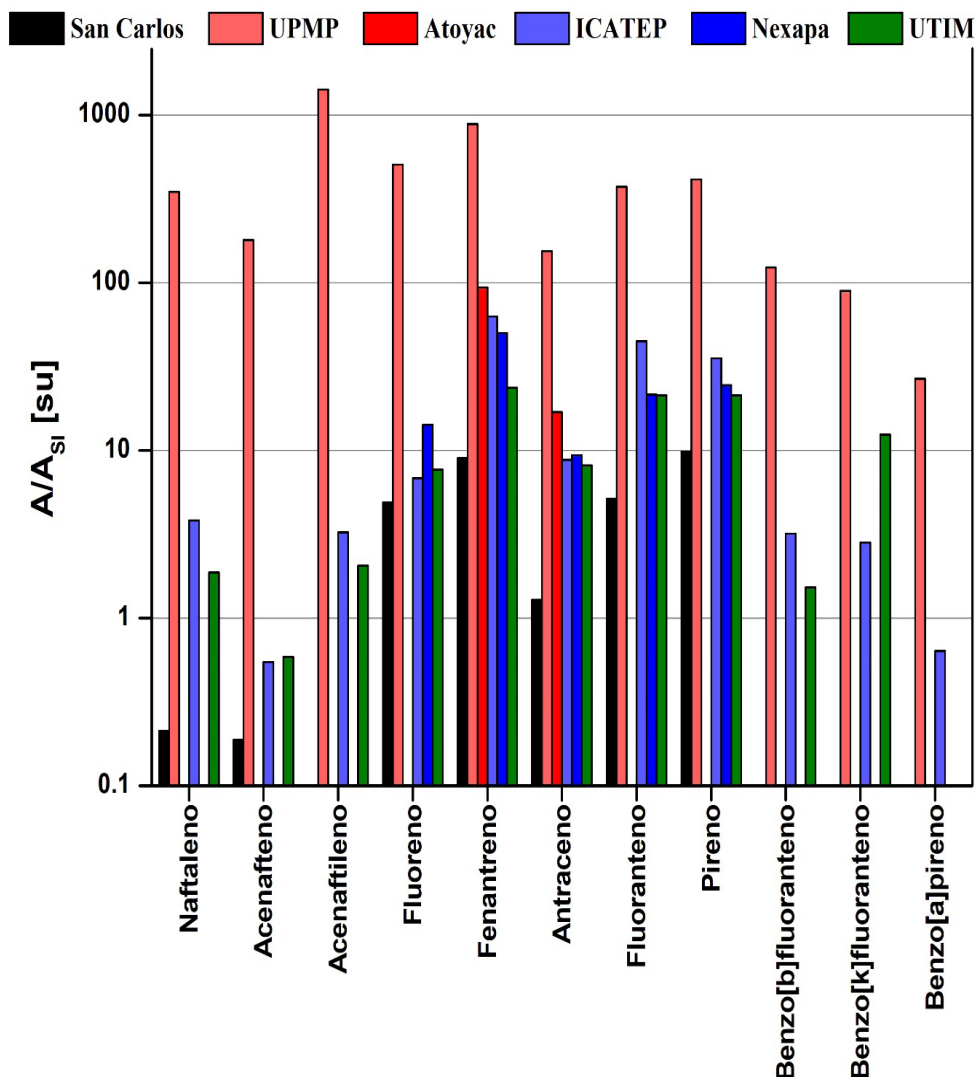
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)

Como se anticipó, la gran cantidad de MCO encontrada en todas las muestras evidencia la complejidad de estas y el nivel de contaminación tanto de los ríos como del aire a sus alrededores. Se destaca la presencia especialmente en la ciudad de Puebla de una curva de compuestos no resueltos, característica de la presencia de hidrocarburos alifáticos, ramificados, alicíclicos y aromáticos, que se originan principalmente del uso de combustibles fósiles y la combustión incompleta de materia orgánica (Hussain *et al.*, 2018); incluso, dependiendo de su estructura química y las condiciones ambientales, son más propensos a unirse al MP, lo que explica la diferencia de concentraciones entre estos compuestos (Figura 4).

Además, es sabido que la exposición a los HAP está relacionada con el aumento de la probabilidad de desarrollar cáncer y tener efectos adversos para la salud, como genotoxicidad, inmunotoxicidad y problemas reproductivos.

Se hallaron fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno y pireno en las muestras de los ríos y en las de aire, pero hubo algunos compuestos que solamente se encontraron en las muestras de aire, como naftaleno, acenafteno y acenaftileno. Se destaca la presencia de benzo[b]- y benzo[k]fluoranteno, así como benzo[a]pireno por ser de los HAP con mayor evidencia de ser carcinogénicos. Los HAP se encontraron en mayor concentración en las muestras de aire de la UPMP y los más ligeros (naftaleno, acenafteno y acenaftileno) fueron los únicos que no se encontraron en San Carlos.

Figura 4. Relación de áreas relativas (A/A_{SI}) sin unidades [su] entre las diferentes muestras de aire y de agua analizadas para los HAP.



Compuestos presentes en productos de cuidado personal (PCP)

Además de los HAP, otra evidencia de contaminantes de origen antropogénico es la presencia de productos de cuidado personal, como son: metil dihidrojasmonato (MDHJ), alquilfenoles (AF), cafeína, galaxolide, tonalide, AF metoxilados, cinoxato, AF dietoxilados y parsol MCX, cuyas concentraciones relativas en cada muestra se encuentran en la Figura 5.

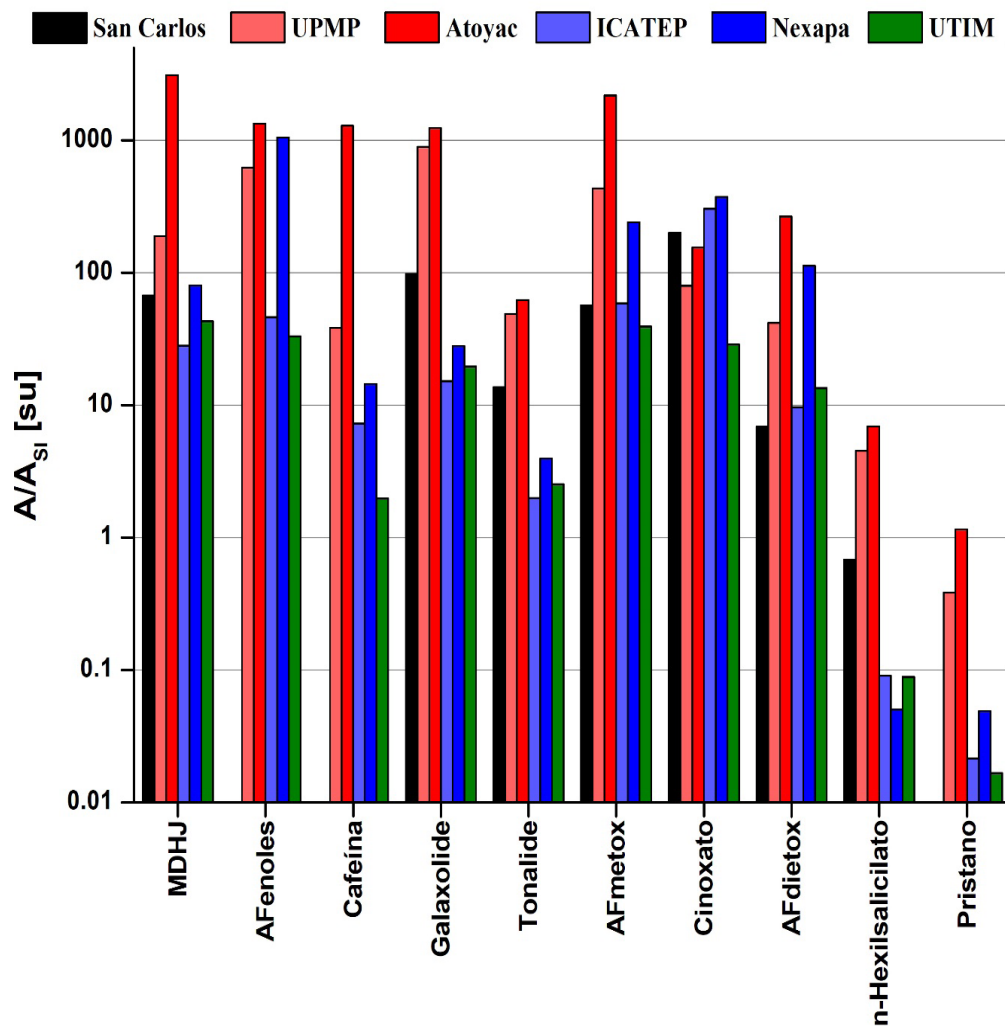


Figura 5. Relación de áreas relativas (A/A_{si}) sin unidades [su] entre las diferentes muestras de aire y de agua analizadas para compuestos presentes en productos de cuidado personal.

Los alquilfenoles son compuestos comúnmente usados como precursores de otros productos químicos y son el producto final de la degradación de componentes de los detergentes no iónicos, además, tienen un alto potencial de ser dañinos para el ambiente. Compuestos como el galaxolide y el tonalide son utilizados en productos de limpieza y cuidado personal como detergentes, champús, lociones y perfumes, siendo considerados de interés ambiental por el daño que producen en el ambiente (Friday O. Ehiguese *et al.*, 2020; Friday Ojie Ehiguese, 2021; Gao *et al.*, 2016).

Por otra parte, la presencia de cafeína es un marcador de la contaminación antropogénica ampliamente utilizado, ya que está presente en productos alimenticios, así como en fármacos. El hecho de que se encuentre en cantidades detectables usualmente está relacionado con la poca eficiencia de las plantas de tratamiento (Neves *et al.*, 2022), en caso de que existan. Además, tiene la capacidad de bioacumularse en peces, algas y otras plantas acuáticas, afectando incluso a los seres vivos que se alimentan de ellos (Li, He, *et al.*, 2020). Sin embargo, a pesar de las altas concentraciones de cafeína en el ambiente,

la mayoría de los estudios se han realizado para cuerpos de agua dulce (Li, Wen, *et al.*, 2020) o salada (Vieira *et al.*, 2022), dejando un poco de lado su presencia en el aire, aunque hay un reporte de este fenómeno en Nueva York en 1975 (Dong *et al.*, 1977).

Cabe resaltar que, en la mayoría de los casos, el par Atoyac-UPMP muestra las concentraciones superiores, excepto en el caso del cinoxato (protector solar), que es un poco superior en el par Nexapa-ICATEP, seguido por el punto tomado como referencia (San Carlos). Este caso ilustra lo complicado que es ubicar un punto que realmente esté “libre” de MCO en el MP.

Productos de uso industrial

En la Figura 6 se muestran las concentraciones relativas de productos que están presentes en la fabricación de productos de uso industrial, como son feniletil alcohol, butoxietoxietanol, dowlanol EPH, TCD alcohol, NN-dibutilformamida (NN-dBfamida), surfynol 104, dibenzofenona, hexilcinamaldehído y bencilbenzoato.

Estos MCO también presentan concentraciones superiores para las muestras del Atoyac, seguida por la muestra de la UPMP, excepto en el caso de la NN-dBfamida (usada como disolvente, en la fabricación de plaguicidas y adhesivos), que fue superior en el ICATEP. Aunque la concentración de este compuesto es muy similar en los demás puntos, es probable la existencia de una fuente principal en las cercanías al punto de medición.

Productos de uso en la industria de alimentos

Otro grupo de productos que provienen de fuentes antropogénicas son los productos usados en la producción de alimentos: benzoato de metilo, feniletil alcohol, mentol, α -Terpineol, vainillina y BHT, que se presentan en la Figura 7.

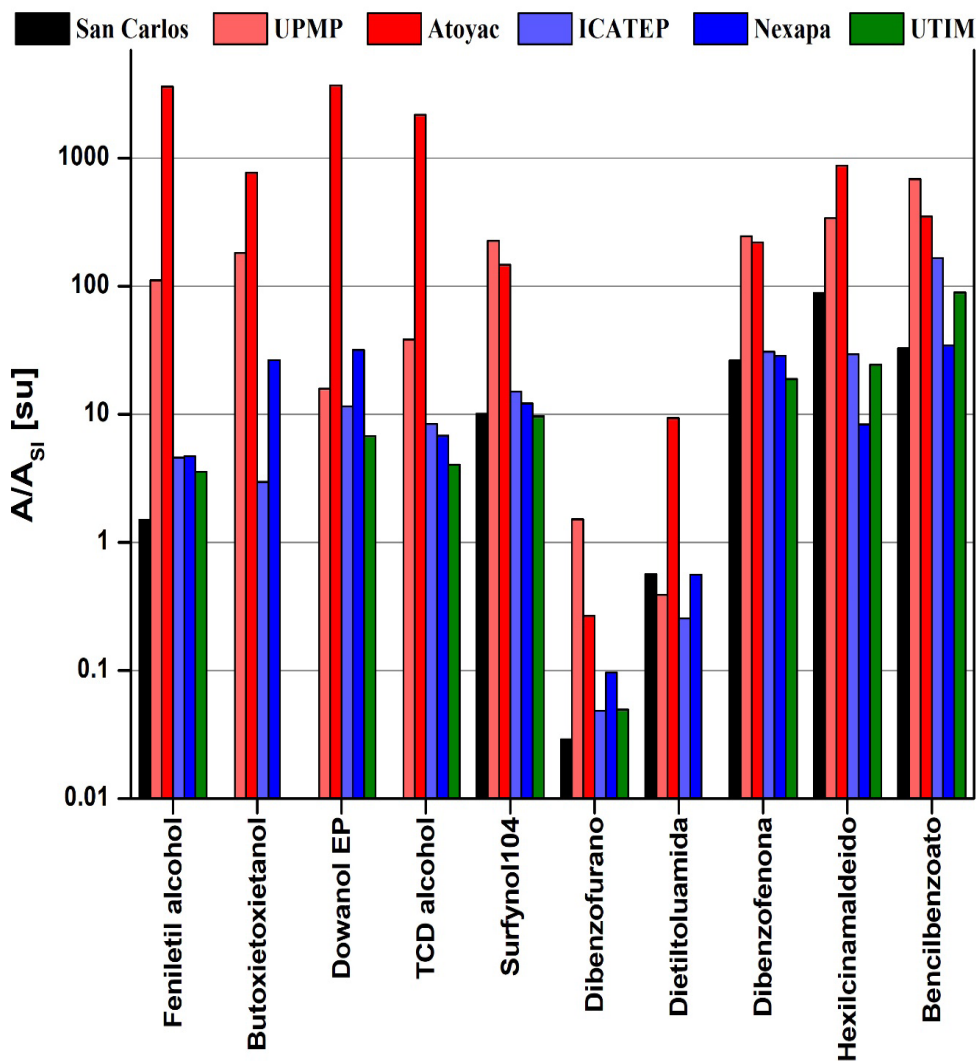
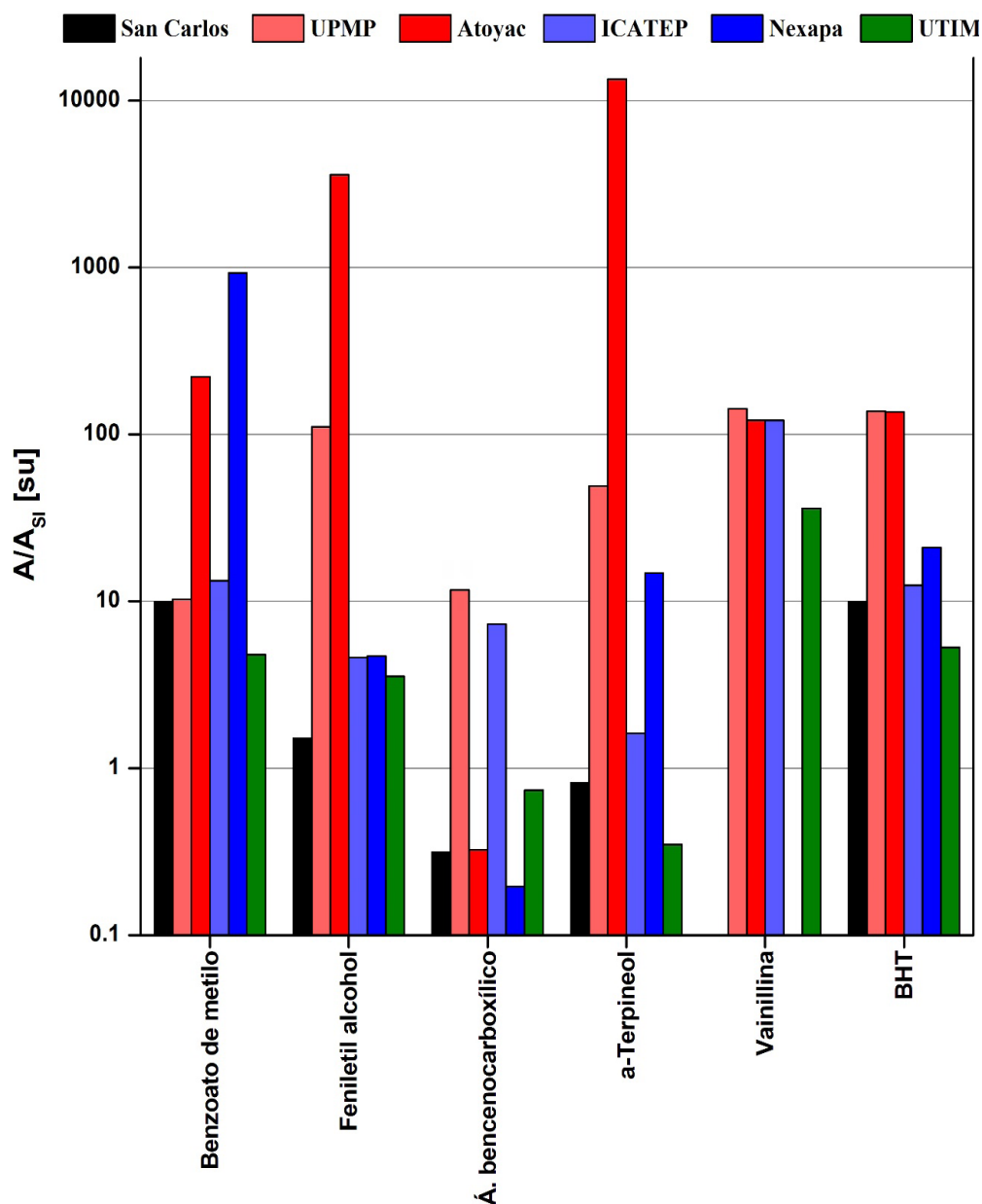


Figura 6. Relación de áreas relativas (A/A_{si}) sin unidades [su] entre las diferentes muestras de aire y de agua analizadas para compuestos presentes en productos de origen industrial.

El estudio de estos contaminantes también se centra en cuerpos de agua, especialmente en agua dulce. Algunos ensayos en animales han demostrado que el uso prolongado de algunos de ellos tiene efectos adversos a la salud (Abo-EL-Sooud *et al.*, 2018).

Figura 7. Relación de áreas relativas (A/A_{SI}) sin unidades [su] entre las diferentes muestras de aire y de agua analizadas para compuestos presentes en la producción de alimentos.



El benzoato de metilo ha sido usado como plaguicida, por ser una sustancia que se encuentra de forma natural en el ambiente; sin embargo, se ha demostrado que es un compuesto tóxico para las abejas (Zhu *et al.*, 2019), por lo que su presencia en el aire puede representar problemas ambientales en el corto y mediano plazo.

Este grupo hace más evidente el alto nivel de contaminación del Atoyac, pues las concentraciones de MCO en esta muestra son 10 veces mayores a las de las otras muestras. Incluso, hay compuestos que solamente están presentes en la región de muestreo del

Atoyac, como es el caso del mentol. Otro caso interesante es el de la vainillina, que se encontró, además de en el Atoyac, en las muestras de aire tomadas en el ICATEP y en la UTIM, pero no así en el Nexapa. La comparación de las concentraciones relativas de estos se muestra en la Figura 7. Debido a que estas sustancias son comunes en la producción de alimentos (también usadas como fragancias), se sugieren fuentes puntuales para estos contaminantes, lo cual requiere un análisis que se escape de los objetivos del presente estudio.

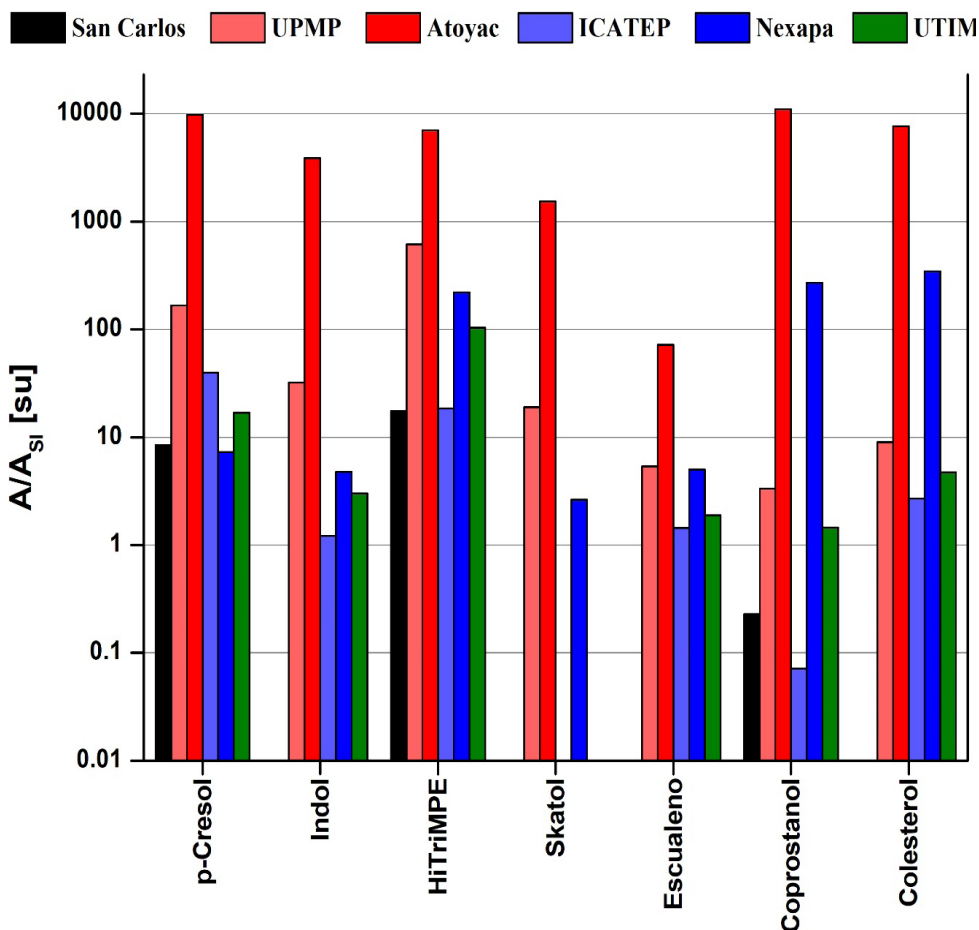
Sustancias presentes en las excretas

Como es de suponer, muchos de los productos consumidos por el ser humano llegan al ambiente a través de la excreta de orina y heces, por lo que el monitoreo de metabolitos humanos y de otros mamíferos, como el coprostanol, ha sido usado como indicador de la contaminación fecal en cuerpos de agua desde hace décadas (Kanazawa y Teshima, 1978), porque no ocurren de forma natural en estos sitios (Leeming *et al.*, 1996). Además, entre el 90 y el 95% de este compuesto se degrada en aguas naturales en un periodo de 2 semanas, por lo que su presencia también indica su descarga directa en los ríos (Nakagawa *et al.*, 2019).

Otra evidencia de la descarga doméstica a los ríos es la presencia de 3-Hidroxi-2,2,4-trimetilpentil, éster del ácido isobutanoico (HiTriMPE), el cual se encuentra en muestras de orina humana (Zhang *et al.*, 2012).

En este grupo de MCO, además del coprostanol y del HiTriMPE, se encuentran fenol, p-cresol, indol, skatol, y colesterol. Como es de esperar, la muestra del Atoyac es la que presenta mayor concentración relativa de todos los contaminantes, seguida por la muestra UPMP en la mayoría de los casos, exceptuando al coprostanol y al colesterol, que tienen mayores valores para las muestras de los ríos (Figura 8).

Figura 8. Relación de áreas relativas (A/A_{SI}) sin unidades [su] entre las diferentes muestras de aire y de agua analizadas para compuestos presentes en las excretas.



Agentes plastificantes

Otros compuestos comúnmente encontrados en los ríos son los compuestos químicos para la fabricación de plásticos o agentes plastificantes, como los ftalatos (Figura 9). Estos contaminantes son vertidos a cuerpos de agua en forma de desechos plásticos y se sabe que pueden interrumpir la señalización endocrina (lo que altera el balance hormonal, produciendo modificaciones en la conducta y el desarrollo), reduciendo la fertilidad, aumentando el riesgo de padecer cáncer y afectando también al sistema nervioso (Landrigan *et al.*, 2020). La presencia de ftalatos ha sido documentada en el MP de la Ciudad de México (Quintana-Belmares *et al.*, 2018) y en Zhenjiang, China (Chen *et al.*, 2019).

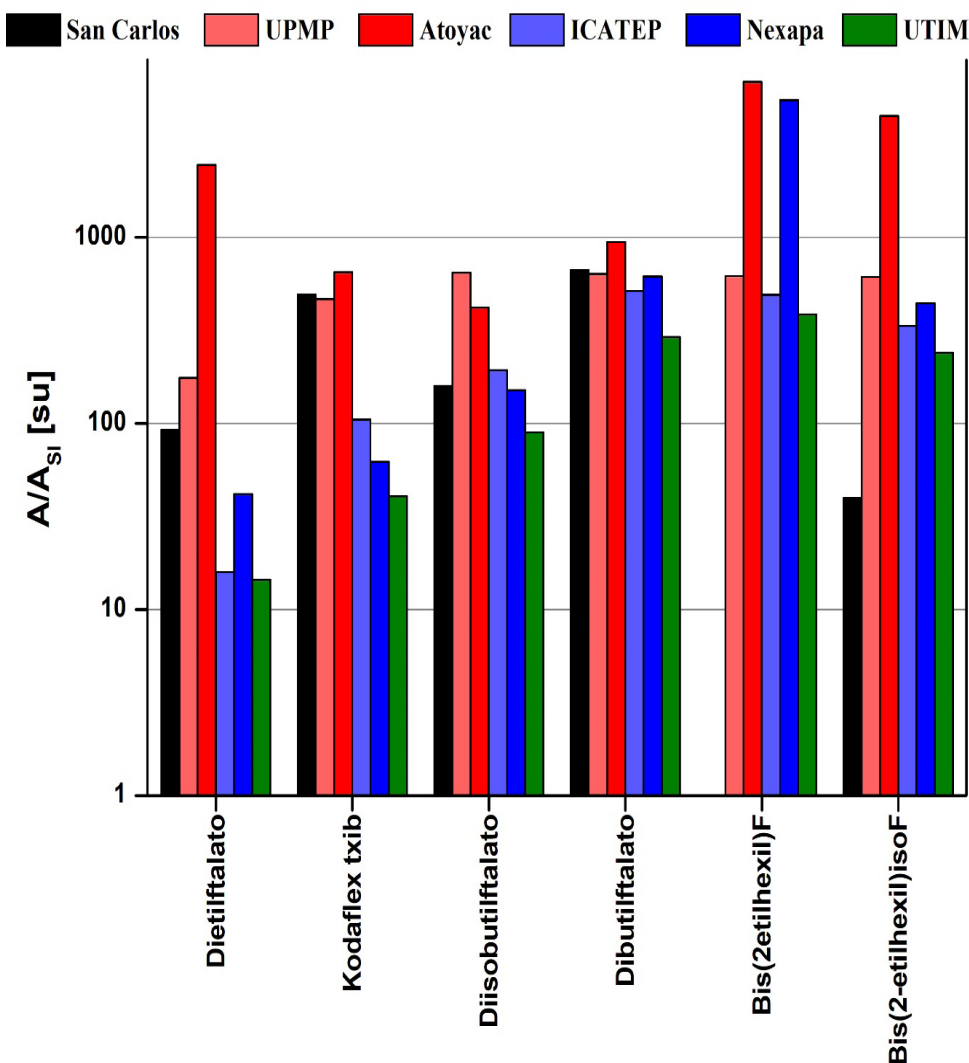


Figura 9. Relación de áreas relativas (A/A_{si}) sin unidades [su] entre las diferentes muestras de aire y de agua analizadas para agentes plastificantes.

Además de 6 ftalatos (dimetil-, dietil-, diisobutil-, dibutil-, bis(2-etilhexil)- y bis(2-etilhexil)isofalatos), se observó la presencia de kodaflex txib y bisoflex DOA. El primero es usado en elastómeros de poliuretano, mientras que el segundo se emplea como plastificante en el PVC. Es interesante notar que el dimetilftalato solamente se encontró en las muestras de los ríos, siendo mayor en el Nexapa. Por su parte, el dibutilftalato presenta valores cercanos para los distintos puntos de muestreo. La distribución tan heterogénea de este grupo de contaminantes muestra la complejidad de las muestras y cómo las propiedades físicas y químicas de los MCO influyen en su transporte y destino; sin embargo, este análisis no está dentro de los objetivos de este estudio.

Análisis factorial

Todos estos compuestos, aunque están presentes en la mayoría de los puntos, no necesariamente reflejan el transporte de la contaminación de los ríos al aire, debido a que pueden provenir de otras fuentes, como los HAP. Sirva de ejemplo mencionar que San Carlos fue el único punto en el que se detectó la presencia de dietiltoluidina, compuesto utilizado como plaguicida en granjas con animales estabulados. En este caso, su aparición puede deberse a la existencia de una granja porcícola ubicada a 1 km del punto de muestreo (Figura 1C).

Con el objetivo de esclarecer la relación entre los MCO presentes en el MP en las cercanías de los ríos y la contaminación de estos, y con la intención de seleccionar compuestos que sirvan para evaluar esta relación, se realizó un análisis factorial. De forma inicial se llevó a cabo este análisis con la lista reducida a 100 compuestos. Como era de esperar, la matriz de correlación no queda conformada correctamente debido a la gran cantidad de correlaciones significativas entre las variables, causada por el origen común de los MCO y el reducido número de puntos de muestreo.

A pesar de lo anterior, el análisis sigue siendo válido, puesto que permite apreciar las proyecciones de la variable conocida en inglés como *factor loadings (FL)* en los tres primeros factores hacia donde apuntan dichos vectores. Estos tres factores explican el 100 % de la varianza debido a las ya mencionadas correlaciones significativas entre los MCO analizados. Posteriormente, se realizó este mismo análisis con los MCO que tuvieran estándares de referencia fáciles de adquirir (pensando en una futura cuantificación), reduciendo la lista a 24 compuestos. En la Figura 10A y 10B se muestran las gráficas tridimensionales de las puntuaciones (*factor scores, FS*) obtenidas para estos dos análisis, respectivamente. Como es de esperar, se obtiene un resultado similar, demostrando que el análisis de los 24 MCO es suficiente para evaluar el MP. Sin embargo, como este es un análisis preliminar, no es aconsejable reducir las variables, puesto que los estudios posteriores tendrán un mayor número de puntos de muestreo y, probablemente, se detecten otros MCO no analizados en este trabajo.

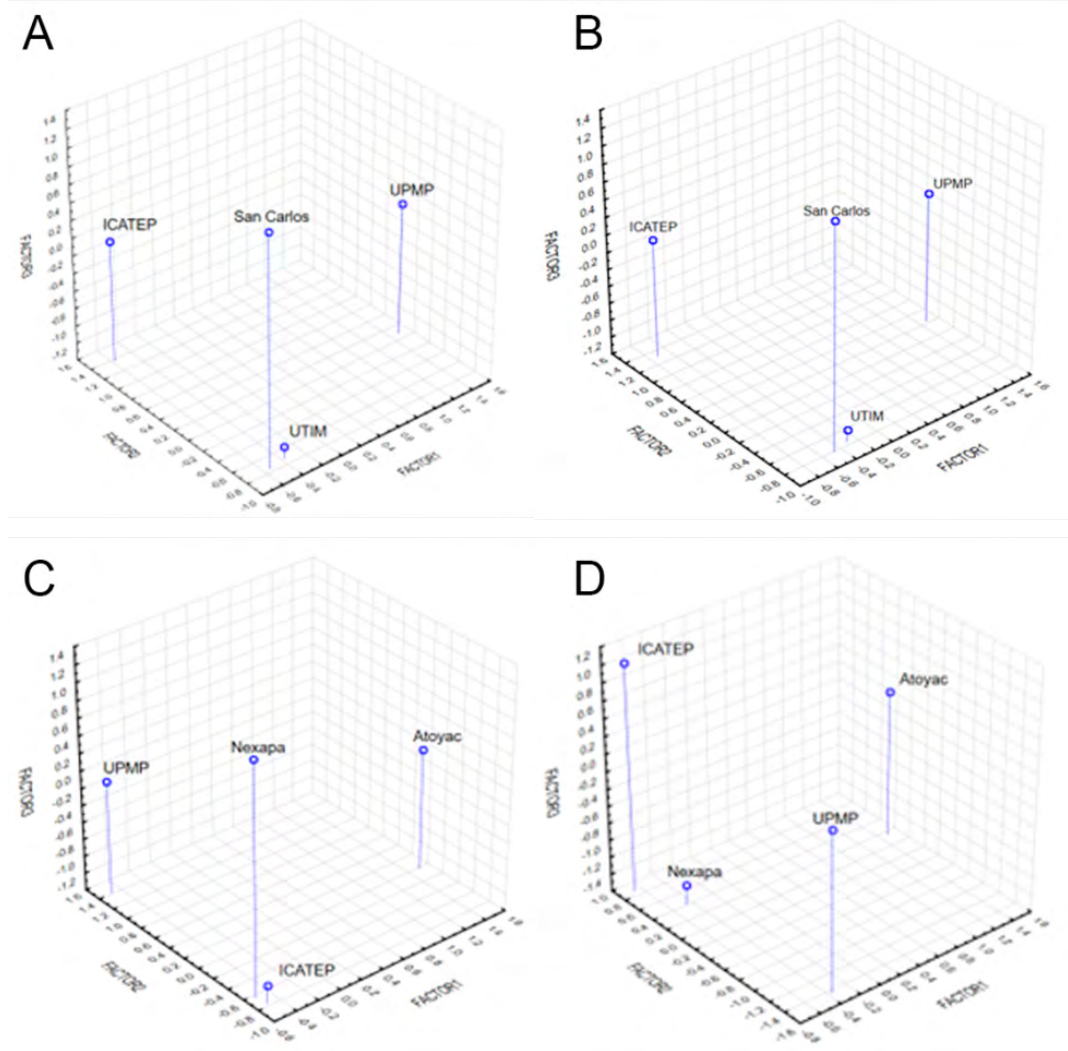
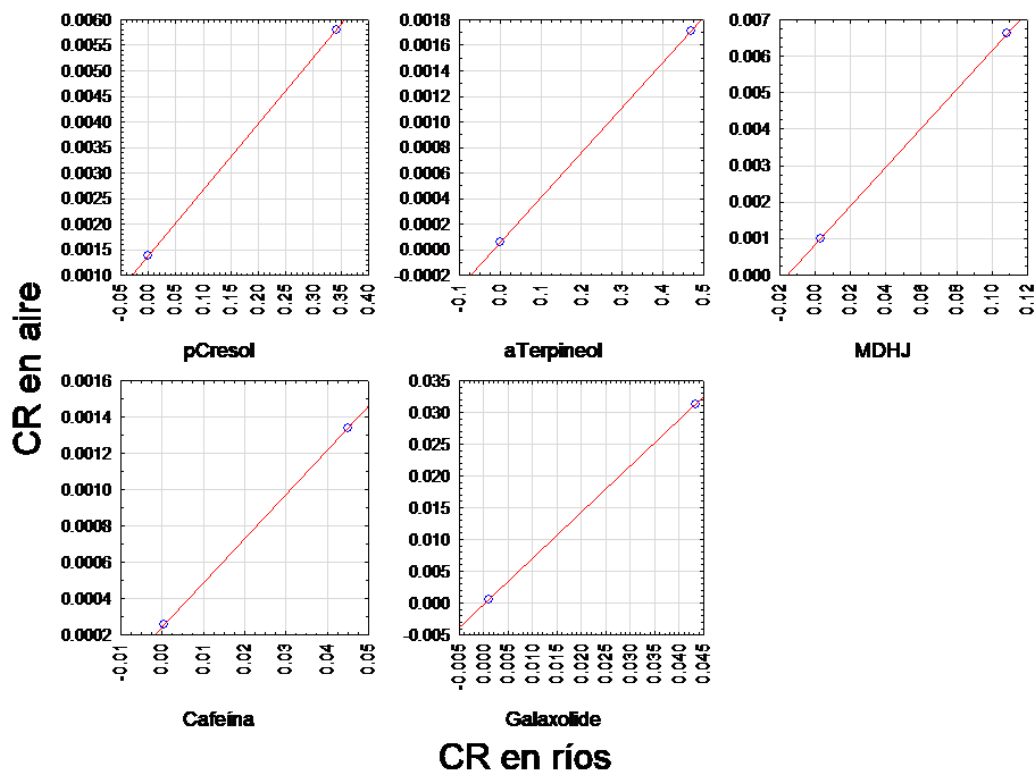


Figura 10. Gráficas 3D de las puntuaciones (*factor scores*) del análisis factorial para (A) los 100 compuestos identificados, (B) los 24 compuestos de los que se pueden conseguir los estándares dentro de estos 100 compuestos, (C) los 47 compuestos presentes en el aire, debido a su presencia en los ríos y (D) los 16 compuestos de los que se pueden conseguir estándares a partir de la lista de los 50 compuestos anteriores.

Como se ha mencionado, los MCO presentes en el MP pueden provenir de muchas fuentes, por lo que es necesario elucidar cuáles de ellos tienen su origen en los cuerpos de agua. Con este objetivo, se normalizaron las concentraciones relativas de los MCO en las muestras Atoyac, UPMP, Nexapa e ICATEP para estudiar la correlación entre las muestras de aire y las de los ríos para la lista de los 100 compuestos. Cuando la correlación es positiva (Figura 11) significa que el MCO está presente en las muestras de aire de la UPMP y del ICATEP como consecuencia de que dicho MCO está en las muestras de agua del río Atoyac o del Nexapa, respectivamente.

Figura 11. Correlaciones positivas para algunos MCO tomados como ejemplo. Estas correlaciones se hicieron para todos los compuestos presentes tanto en las muestras de aire como en las de agua.



Este análisis mostró que 47 de los MCO hallados en el MP suspendido en el aire deben su presencia a la contaminación de los ríos. Con estos compuestos se realizó un análisis de factores, cuya gráfica de puntuaciones se muestra en la Figura 10C. Así, se eligieron compuestos candidatos a marcadores cuyos estándares de referencia fueran fáciles de adquirir y se realizó el análisis para estos 16 compuestos, dando un resultado similar (Figura 9D) para los 47 MCO inicialmente analizados. Las proyecciones (*factor loadings*) obtenidas para los MCO en estos dos análisis se muestran en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Proyecciones (FL) en los tres factores del análisis de factores realizado para los compuestos candidatos a ser marcadores del impacto del río debido a la presencia de MCO en el MP en su atmósfera circundante.

No.	Compuesto	Factor 1	Factor 2	Factor 3
1	o-Cresol	0.99427	0.10688	-0.000585
2	m-Cresol	0.59547	0.79395	-0.122694
3	p-Cresol	0.99998	0.00404	0.004377
4	Benzoato de metilo	-0.12160	-0.45108	0.884160
5	Feniletil alcohol	0.99981	0.01857	0.006324
6	Ácido bencenocarboxílico	-0.52916	0.64168	-0.555190

No.	Compuesto	Factor 1	Factor 2	Factor 3
7	Butoxietoxietanol	0.97676	0.21313	0.022508
8	[-Terpineol	0.99994	-0.00675	0.008478
9	Dowanol EP	0.99986	-0.01092	0.012417
10	TCD alcohol	0.99997	0.00365	0.006508
11	Indol	0.99996	-0.00254	0.008192
12	C2-Naftaleno	-0.30856	0.94844	-0.072527
13	Ácido propanoico, 2-metil-, 2,2-dimetil-1-(2-hidroxi-1-metiletil)propil éster	0.99738	0.07163	-0.010583
14	3-Hidroxi-2,2,4-trimetilpentil éster del ácido isobutanoico	0.99776	0.06042	0.028550
15	3-Metilindol, skatol	0.99996	0.00132	0.008647
16	Vainillina	0.26721	0.54755	-0.792960
17	Surfynol 104	0.31182	0.94823	-0.060300
18	C3-Naftaleno	-0.30878	0.94909	-0.062350
19	BHT	0.57806	0.81593	0.010137
20	Dibenzofurano	-0.19543	0.98036	-0.026376
21	Dietiltoluamida	0.99932	-0.00990	0.035550
22	Dietilftalato	0.99871	0.04893	0.013559
23	Kodaflex txib	0.77944	0.62006	-0.089447
24	Dibenzofenona	0.50580	0.86113	-0.051179
25	MDHJ	0.99925	0.03337	0.019637
26	1-Tetradecanol	0.99957	0.00901	0.027822
27	n-Hexilsalicilato	0.79351	0.60772	-0.031972
28	Pristano	0.95228	0.30499	0.011736
29	AFenoles	0.67417	0.09261	0.732751
30	Hexilcinamaldeido	0.93096	0.36351	-0.034333
31	Bencilbenzoato	0.10812	0.96425	-0.241933
32	1-Pentadecanol	0.90956	0.41494	0.022787
33	Fenantreno	-0.28277	0.95687	-0.066690
34	Antraceno	-0.27422	0.96033	-0.050669
35	Cafeína	0.99988	0.01095	0.011355
36	Diisobutilftalato	0.20666	0.96999	-0.128140

No.	Compuesto	Factor 1	Factor 2	Factor 3
37	Galaxolide	0.75365	0.65692	-0.021672
38	Tonalide	0.72144	0.69245	-0.006436
39	AFmetox	0.98848	0.13092	0.075884
40	Dibutilftalato	0.95856	0.18516	0.216527
41	Cinoxato	-0.37398	-0.89190	0.254274
42	AFdietox	0.92167	-0.06952	0.381686
43	Bis(2etilhexil)ftalato	0.70245	-0.31088	0.640249
44	Bis(2-etilhexil)isofthalato	0.99866	0.04418	0.026996
45	Escualeno	0.99855	0.02236	0.048896
46	Coprostanol	0.99939	-0.01991	0.028592
47	Colesterol	0.99854	-0.02830	0.046113

Tabla 3. Proyecciones (FL) en los tres factores del análisis de factores realizado para los compuestos candidatos a ser marcadores del impacto del río debido a la presencia de MCO en el PM10 en su atmósfera circundante, y de los cuales se pueden conseguir estándares de referencia.

No.	Compuesto	Factor 1	Factor 2	Factor 3
1	p-Cresol	0.99279	0.096323	0.071407
2	Benzoato de metilo	-0.08263	0.312146	-0.946434
3	α -Terpineol	0.99214	0.106396	0.065806
4	Indol	0.99252	0.102291	0.066695
5	C2-Naftaleno	-0.22778	-0.956029	0.184724
6	Vainillina	0.24378	-0.404928	0.881252
7	BHT	0.64727	-0.747208	0.150732
8	Dietiltoluamida	0.99364	0.105762	0.038592
9	MDHJ	0.99603	0.065271	0.060510
10	AFenoles	0.74198	-0.122824	-0.659073
11	Fenantreno	-0.20093	-0.962529	0.182114
12	Antraceno	-0.19072	-0.967258	0.167445
13	Cafeína	0.99391	0.088557	0.065507
14	Galaxolide	0.80444	-0.568452	0.172456

No.	Compuesto	Factor 1	Factor 2	Factor 3
15	AFmetox	0.99905	-0.039599	0.018222
16	AFdietox	0.94194	0.109648	-0.317364
17	Coprostanol	0.99220	0.116584	0.044024

Cápsula #3

Mediante el estudio de las correlaciones positivas entre los contaminantes presentes en las muestras de aire y las de los ríos, se identificaron 50 compuestos cuya presencia en el aire se debe a los ríos. De estos, se seleccionaron 14 contaminantes que servirán como marcadores de la contaminación del aire proveniente de esta fuente. El reducido número de marcadores seleccionados permite la optimización de recursos y el análisis de los resultados para futuros trabajos, tanto propios como de otros grupos de investigación.

Estudio microbiológico

El estudio microbiológico de los bioaerosoles únicamente se realizó en las muestras de aire UPMP, ICATEP y UTIM. La concentración de ADN encontrada en los filtros varía de manera importante, encontrándose una mayor cantidad de ADN en el filtro correspondiente a la zona del río Atoyac (UPMP), y la menor en una zona alejada del río (UTIM); sin embargo, para conocer la biodiversidad microbiana es necesario realizar la secuenciación de las muestras, estudio que aún está en proceso. Las mediciones que se realizaron con el equipo *Nanodrop* de cada una de las extracciones dan los resultados que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de las mediciones realizadas con el *Nanodrop*.

Filtro	Concentración en µg/mL	λ260/280	λ260/230
Filtro ICATEP	5.309	1.706	0.214
Filtro UTIM	3.087	0.827	0.146
Filtro UPMP	16.997	1.815	0.293

Conclusiones

El muestreo de alto volumen, así como la extracción de las muestras tomando como base el método TO13A de la EPA, es un método efectivo para evaluar la presencia y concentraciones relativas de MCO en el MP. Sin embargo, es necesario añadir una etapa de separación por cromatografía en columna para aumentar la eficacia y eficiencia del análisis cromatográfico de los MCO para estudios futuros.

La gran complejidad de las muestras de agua y de MP refleja la cantidad de MCO mayoritariamente antropogénico en las mismas, así como de ADN microbiológico, lo que indica la existencia de un factor de riesgo para la salud humana, especialmente de las personas que habitan y permanecen largos periodos cerca del cauce de los ríos. Este aspecto debe ser atendido y estudiado a partir de la metodología de la OMS para la determinación de los riesgos.

Mediante un análisis de correlación se identificaron 47 compuestos que están presentes en el aire como consecuencia de la contaminación de los ríos por estos mismos 47 MCO, como es el caso del metil dihidrojasmonato, la cafeína, el galaxolide, los alquilfenoles, el coprostanol y algunos ftalatos. Sin embargo, para realmente evaluar el impacto que esta contaminación tiene sobre el ambiente y la salud, es necesario realizar una evaluación cuantitativa. Con este fin se seleccionaron 17 compuestos que servirán como marcadores de la contaminación que llega al aire a través de los ríos, y de los cuales se pueden adquirir estándares de referencia para realizar el análisis cuantitativo correspondiente, facilitando así investigaciones futuras.

Los resultados de la extracción de ADN se corresponden bien con los del análisis cromatográfico, pues por ambas vías la contaminación decrece en el orden UPMP > ICA-TEP > UTIM. Sin embargo, es necesario completar este análisis con la secuenciación de las muestras.

Finalmente, para un estudio futuro se propone evaluar las concentraciones de los MCO y microbiológicos de mayor importancia en varios puntos de la ciudad, para realizar un estudio espaciotemporal de los mismos. Además, se sugiere valorar la factibilidad de utilizar para ello las muestras de bajo volumen de la Red de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de Puebla.

Referencias

- Abo-EL-Sooud, K., Hashem, M. M., Badr, Y. A., Eleiwa, M. M. E., Gab-Allaha, A. Q., Abd-Elhakim, Y. M., y Bahy-EL-Dien, A. (2018). Assessment of hepato-renal damage and genotoxicity induced by long-term exposure to five permitted food additives in rats. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(26), 26341-26350. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2665-z>
- Chen, H., Mao, W., Shen, Y., Feng, W., Mao, G., Zhao, T., Yang, L., Yang, L., Meng, C., Li, Y., y Wu, X. (2019). Distribution, source, and environmental risk assessment of phthalate esters (PAEs) in water, suspended particulate matter, and sediment of a typical Yangtze River Delta City, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(24), 24609-24619. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05259-y>
- Dong, M., Hoffmann, D., Locke, D. C., y Ferrand, E. (1977). The occurrence of caffeine in the air of New York city. *Atmospheric Environment* (1967), 11(7), 651-653. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(77\)90121-4](https://doi.org/10.1016/0004-6981(77)90121-4)
- Ehiguese, Friday O., Alam, M. R., Pintado-Herrera, M. G., Araújo, C. V. M., y Martin-Diaz, M. L. (2020). Potential of environmental concentrations of the musks galaxolide and tonalide to induce oxidative stress and genotoxicity in the marine environment. *Marine Environmental Research*, 160, 105019. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105019>
- Ehiguese, Friday Ojie. (2021). *Ecotoxicological assessment of galaxolide and tonalide as contaminants of emerging concern in marine ecosystems* [Universidad de Cádiz]. <http://hdl.handle.net/10261/268014>
- Gallego-Hernández, A. L., Meza-Figueroa, D., Tanori, J., Acosta-Elías, M., González-Grijalva, B., Maldonado-Escalante, J. F., Rochín-Wong, S., Soto-Puebla, D., Navarro-Espinoza, S., Ochoa-Contreras, R., y Pedroza-Montero, M. (2020). Identification of inhalable rutile and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) nanoparticles in the atmospheric dust. *Environmental Pollution*, 260, 114006. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114006>
- Gao, Y., Ji, Y., Li, G., Mai, B., y An, T. (2016). Bioaccumulation and ecotoxicity increase during indirect photochemical transformation of polycyclic musk tonalide: A modeling study. *Water Research*, 105, 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.055>

- Hickey, J. L. S., y Reist, P. C. (1975). Health significance of airborne microorganisms from wastewater treatment processes. I. Summary of investigations. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 47(12), 2741-2757.
- Hussain, K., Hoque, R. R., Balachandran, S., Medhi, S., Idris, M. G., Rahman, M., y Hussain, F. L. (2018). Monitoring and Risk Analysis of PAHs in the Environment. En *Handbook of Environmental Materials Management* (pp. 1-35). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58538-3_29-2
- Kanazawa, A., y Teshima, S.-I. (1978). The occurrence of coprostanol, an indicator of faecal pollution, in sea water and sediments. *Oceanologica Acta*, 1(1), 39-44.
- Landrigan, P. J., Stegeman, J. J., Fleming, L. E., Allemand, D., Anderson, D. M., Backer, L. C., Brucker-Davis, F., Chevalier, N., Corra, L., Czerucka, D., Bottein, M.-Y. D., Demeneix, B., Depledge, M., Deheyn, D. D., Dorman, C. J., Fénichel, P., Fisher, S., Gaill, F., Galgani, F., ... Rampal, P. (2020). Human Health and Ocean Pollution. *Annals of Global Health*, 86(1), 151. <https://doi.org/10.5334/aogh.2831>
- Leeming, R., Ball, A., Ashbolt, N., y Nichols, P. (1996). Using faecal sterols from humans and animals to distinguish faecal pollution in receiving waters. *Water Research*, 30(12), 2893-2900. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00011-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00011-5)
- Li, S., He, B., Wang, J., Liu, J., y Hu, X. (2020). Risks of caffeine residues in the environment: Necessity for a targeted ecopharmacovigilance program. *Chemosphere*, 243, 125343. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125343>
- Li, S., Wen, J., He, B., Wang, J., Hu, X., y Liu, J. (2020). Occurrence of caffeine in the freshwater environment: Implications for ecopharmacovigilance. *Environmental Pollution*, 263, 114371. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114371>
- Maldonado-Vega, M., Peña-Cabriales, J. J., De Los Santos Villalobos, S., Castellanos-Arévalo, A. P., Camarena-Pozos, D., Arévalo-Rivas, B., Valdés-Santiago, L., Hernández-Valadez, L. J., y Guzmán De Peña, D. L. (2014). Bioaerosoles y evaluación de la calidad del aire en dos centros hospitalarios ubicados en León, Guanajuato, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(4). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000400004
- Mora, A., García-Gamboa, M., Sánchez-Luna, M. S., Gloria-García, L., Cervantes-Avilés, P., y Mahlknecht, J. (2021). A review of the current environmental status and human health implications of one of the most polluted rivers of Mexico: The Ato-

- Atoyac River, Puebla. *Science of The Total Environment*, 782, 146788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146788>
- Nakagawa, K., Amano, H., Berndtsson, R., Takao, Y., y Hosono, T. (2019). Use of sterols to monitor surface water quality change and nitrate pollution source. *Ecological Indicators*, 107, 105534. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105534>
- Navarro, A. E., y Delgado Rodríguez, A. (2014). Impactos antrópicos en la calidad del aire: el particulado atmosférico. *Memorias del II Seminario de Ciencias Ambientales Sue-Caribe y VII Seminario Internacional de Gestión Ambiental*.
- Navarro, A. E., Herrera, J. A., y Morales, L. (2017). Los niveles de microcontaminantes orgánicos explican una muerte masiva de peces en el río Atoyac, Puebla, México. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 8(4), 15-23.
- Navarro, A., Herrera, J., Marrugo, J., Bayona, J., y Morales, L. (2014). Microcontaminantes orgánicos en los ríos de México: El caso del río Nexapa. *Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. Handbook T-IV*, 49-63.
- Neves, T. de F., Camparotto, N. G., de Almeida, A. da S. V., da Silva, M. G. C., Prediger, P., y Vieira, M. G. A. (2022). Biomass-derived adsorbents for caffeine removal from aqueous medium. En *Biomass-Derived Materials for Environmental Applications* (pp. 111-134). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91914-2.00004-0>
- OMS. (2022). *Household air pollution*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health#:~:text=Each year%2C 3.2 million people,air pollution data for details>
- Osorio, M. A., Torrijos, T., y Sánchez, A. (2013). Air Quality Management in Agua Santa, Puebla. *Revista Latinoamericana del Ambiente y las Ciencias*, 4(7), 1-12.
- Pérez Castresana, G., Castañeda Roldán, E., García Suastegui, W. A., Morán Perales, J. L., Cruz Montalvo, A., y Handal Silva, A. (2019). Evaluation of Health Risks due to Heavy Metals in a Rural Population Exposed to Atoyac River Pollution in Puebla, Mexico. *Water*, 11(2), 277. <https://doi.org/10.3390/w11020277>
- Pérez Castresana, G., Tamariz Flores, V., López Reyes, L., Hernández Aldana, F., Castrelán Vega, R., Morán Perales, J., García Suastegui, W., Díaz Fonseca, A., y Handal Silva, A. (2018). Atoyac River Pollution in the Metropolitan Area of Puebla, México. *Water*, 10(3), 267. <https://doi.org/10.3390/w10030267>

- Quintana-Belmares, R. O., Kraus, A. M., Esfahani, B. K., Rosas-Pérez, I., Mucs, D., López-Marure, R., Bergman, Å., y Alfaro-Moreno, E. (2018). Phthalate esters on urban airborne particles: Levels in PM10 and PM2.5 from Mexico City and theoretical assessment of lung exposure. *Environmental Research*, 161, 439-445. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.039>
- Sánchez, J., y Caraballo, L. (2015). Impact of air pollution on the development of asthma. *Revista alergia Mexico (Tecamachalco, Puebla, Mexico : 1993)*, 62(4), 287-301. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26556664>
- Tovalín-Ahumada, H., y Whitehead, L. (2007). Personal exposures to volatile organic compounds among outdoor and indoor workers in two Mexican cities. *Science of The Total Environment*, 376(1-3), 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.063>
- Ukaogo, P. O., Ewuzie, U., y Onwuka, C. V. (2020). Environmental pollution: causes, effects, and the remedies. En *Microorganisms for Sustainable Environment and Health* (pp. 419-429). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819001-2.00021-8>
- Vieira, L. R., Soares, A. M. V. M., y Freitas, R. (2022). Caffeine as a contaminant of concern: A review on concentrations and impacts in marine coastal systems. *Chemosphere*, 286, 131675. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131675>
- Xiong, W., Ni, P., Chen, Y., Gao, Y., Li, S., y Zhan, A. (2019). Biological consequences of environmental pollution in running water ecosystems: A case study in zooplankton. *Environmental Pollution*, 252, 1483-1490. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.055>
- Zhang, S., Liu, L., Steffen, D., Ye, T., y Raftery, D. (2012). Metabolic profiling of gender: Headspace-SPME/GC-MS and 1H NMR analysis of urine. *Metabolomics*, 8(2), 323-334. <https://doi.org/10.1007/s11306-011-0315-2>
- Zhu, Y.-C., Wang, Y., Portilla, M., Parys, K., y Li, W. (2019). Risk and Toxicity Assessment of a Potential Natural Insecticide, Methyl Benzoate, in Honey Bees (*Apis mellifera* L.). *Insects*, 10(11), 382. <https://doi.org/10.3390/insects10110382>

Apéndice A. Metodología para la extracción de las muestras de aire y de los ríos analizadas en este trabajo

Las muestras de aire se colectaron y extrajeron utilizando como guía el procedimiento TO13A de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (*USEPA*, por sus siglas en inglés). Brevemente, un filtro de cuarzo se calcina a 400 °C por 4 horas y una espuma de poliuretano (*PUF*) se limpia mediante extracción Soxhlet durante 18 horas con una mezcla de solventes (2 horas con acetona y 16 horas con una mezcla 90:10 de hexano/éter dietílico, *DEH*). El filtro y el *PUF* son colocados en un muestreador de aire de alto volumen (*TISCH Environmental*), que es transportado al punto de muestreo. Después del tiempo de medición establecido, el equipo se regresa al laboratorio para obtener las muestras. El filtro y el *PUF* se extraen conjuntamente en un aparato Soxhlet durante 18 horas con la mezcla *DEH*. El extracto se evapora al vacío (*rotavapor equipment*) y se trasvasa cuantitativamente a un vial ámbar. Se seca con un flujo suave de nitrógeno y, antes de inyectar en el cromatógrafo, se agregan 20 µL de estándar interno (*EI*) y 80 µL de hexano. Después de inyectarlo, el extracto es almacenado a -11 °C.

Las muestras de agua se filtran con papel filtro Whatman 42, previamente calcinado a 65 °C durante 12 horas. El filtro se deja secar durante 6 horas a 65 °C. El filtro se extrae mediante ultrasonido con 25 mL de metanol durante 20 minutos y posteriormente durante otros 20 minutos con 25 mL de acetona/diclorometano (1:1). El agua filtrada se extrae por fase sólida con un cartucho Bond Elut ENV (500 mg de fase sólida) previamente acondicionado según las condiciones del fabricante (10 mL de acetato de etilo, 10 mL de metanol y 10 mL de agua, todo grado cromatográfico, *HPLC*). Cuando la muestra termina de pasar por el cartucho, se deja secar por 30 minutos con una bomba de vacío. La muestra es entonces eluida con 10 mL de acetato de etilo. Los extractos del filtro y del cartucho son rotoevaporados juntos y se sigue el mismo procedimiento empleado para las muestras de aire.

El análisis cromatográfico se realizó por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (*CG/EM*) en un equipo Clarus 680/SQ8T de Perkin Elmer con una columna capilar ZB-5 (30m x 0.25mm x 1 µm) y con helio como gas portador a 1.3 mL/min. Se inyectó en el modo *split/splitless* (relación de *Split* 20:1). El espectrómetro de masas se operó en modo de impacto electrónico, con temperatura de la interfase y el cromatógrafo de 280 °C, temperatura similar para la fuente y un barrido de 35 a 450 m/z. El horno se usó con un programa con temperatura inicial de 90 °C, desde esta

temperatura y hasta 290 °C se utilizó una rampa de 4 °C/min, y de 290 a 310 una de 10 °C/min, manteniendo esta última temperatura durante 24 minutos.

La identificación de los MCO se realizó mediante los cromatogramas de masa de iones característicos de cada compuesto relevante, eligiendo aquellos con menor número de superposiciones con otros. Una vez seleccionados los picos, su identificación se realizó utilizando la biblioteca NIST/EPA/NIH instalada en el equipo, utilizando el programa de búsqueda de la NIST (*NIST Mass Spectra Search Program*). Los cromatogramas de masa correspondientes a las m/z de los iones característicos de las familias de compuestos fueron obtenidos para identificar y cuantificar dichas familias. La lista de dichos iones se presenta a continuación:

- n-alcenos – 85;
- Alquilfenoles (AFenoles) 107+121+135, AFenoles metoxilados (AFmetox) 107+121+135+179+193 y AFenoles dietoxilados (AFdietox) 223+237;
- C1-, C2- y C3- naftalenos con los iones 141+142, 141+156 y 155+170, respectivamente;
- C1-, C2- y C3- fenantrenos con los iones 191+192, 191+206 y 205+220, respectivamente;
- C1-fluorenos – 165+180.

Para garantizar que los compuestos encontrados en cada muestra procedieran del muestreo, también se realizaron blancos analíticos. Para el blanco de agua, se realizó el mismo procedimiento que para las muestras, pero utilizando agua tridestilada. Para el blanco de las muestras de aire, se extrajeron un filtro y un cartucho nuevo mediante el aparato Soxhlet como si fueran muestras. Ambos blancos fueron analizados por CG/EM, junto con las muestras.

Para el estudio de la metagenómica de los filtros de aire se realizó lo siguiente:

1. De los filtros del muestreo se extrajo el ADN con lisozima y con la especificación del kit de extracción de ADN de Macherey Nagel Genomic DNA.
2. Se realizaron geles de agarosa al 1 % para corroborar la presencia del ADN.

