

Lo que debemos de saber sobre las partículas atmosféricas PM₁₀

Ricardo Cruz Yépez¹, Angélica Jazmín Domínguez Gómez², Luis Gabriel Estrada Gámez³, Diana Patricia Martínez Estrada⁴, Mayra Verónica Witrago Cruz⁵, Amanda Enriqueta Violante Gavira⁶

^{1,3,4} Ingeniería Mecatrónica, ^{2,3,6} Ingeniería Mecánica

r.cruzyopez@ugto.mx¹, aj.dominguezgomez@ugto.mx², lg.estradagamez@ugto.mx³, dp.martinezestrada@ugto.mx⁴

,mv.witragocruz@ugto.mx⁵, amanda@correo.mx⁶

Resumen

El material particulado (PM₁₀) es uno de los temas más estudiados por la comunidad científica, es motivo de análisis y discusión en las agendas gubernamentales, científicas y académicas, por las repercusiones que tiene en la salud y el bienestar de las personas y en el medio ambiente. La OMS estima que la contaminación del aire en actualidad afecta aproximadamente a un 90% de la población del planeta, señala también que existe evidencia de relación de estas partículas con un amplio número de enfermedades respiratorias, cáncer y muertes prematuras. El objetivo de este trabajo es presentar información relevante sobre el contexto, concepto, clasificación, origen, composición, propiedades y efectos adversos en la salud humana y en el medio ambiente, con la finalidad de que la sociedad esté al tanto de lo que encierra este peligroso y silencioso contaminante y, con ello, despertar el interés en esta temática integrada en los programas y datos que proporciona la autoridad ambiental los 365 días del año para el autocuidado de la salud.

Palabras clave: material particulado, contaminantes criterio, fuentes de emisión, dispersión y efectos

Introducción

El aire es considerado como un medio fundamental que hace posible la vida, se integra por la mezcla de varios gases: nitrógeno (78%), el oxígeno (21%) y otros gases inertes (1%). En su estado puro y limpio, permite el óptimo desarrollo de las funciones elementales de todo ser vivo. Por esta razón la adecuada proporción y el tipo de componentes de esta mezcla gaseosa (calidad del aire) permite o dificulta una vida saludable, lo que es un derecho de todas las personas (CEMDA, 2016). Desde esta perspectiva, este derecho es violentado cuando la actividad industrial y el transporte masivo que consume importantes cantidades de combustibles fósiles que alteran la composición natural del aire en un período de tiempo y en un lugar determinados (SEMARNAT, SINAICA e INECC, 2018) provocando así el fenómeno de la contaminación atmosférica. En México, el derecho a un medio ambiente sano es un derecho humano en el marco jurídico nacional, que establece el cumplimiento de la alineación de los estándares nacionales e internacionales, a los que la autoridad está obligada para asegurar las condiciones de salud de la población. Esto implica la adecuada gestión de la calidad del aire, la actualización de normas de los contaminantes y sobre mayor rigor en la exigencia y vigilancia de su cumplimiento.

La Environmental Protection Agency (EPA por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos, sugirió a los gobiernos una clasificación de los contaminantes atmosféricos en: contaminantes criterio y contaminantes no criterio. Los primeros representan un mayor riesgo para la salud pública y el medio ambiente, por lo que son el referente de la calidad del aire, principalmente por las causas que los originan y por su naturaleza química (Ubilla y Yohannssen, 2017) y les ha asignado el nombre de contaminantes criterio. Su concentración y tiempo de permanencia en el aire varían dependiendo de la actividad industrial y las condiciones meteorológicas. Los contaminantes no criterio representan menor riesgo para los seres vivos

En este contexto en este trabajo se presenta información que reporta la literatura que es relevante sobre el material particulado: concepto, clasificación, origen, composición, propiedades y efectos adversos en la salud humana y en la del medio ambiente.

Partículas atmosféricas PM₁₀

Debido a su peligrosidad, las partículas atmosféricas de diámetro menor a 10 micras (PM₁₀) pertenecen a los contaminantes criterio por lo que su medición y control son indispensables para la protección humana (WHO, 2018). Son uno de los temas más estudiados hoy en día por la comunidad científica, ya que representan la sexta causa de mortalidad mundial (Stafoggia, Schwartz, Badaloni, Bellander, Alessandrini, Cattani, y Donato, 2016). En la tabla 1 se muestran los contaminantes criterio y los valores máximos que de acuerdo con la OMS no deben superarse para evitar efectos adversos a la salud de la población. También se indican los valores de las normas oficiales mexicanas y los tiempos de exposición.

Tabla 1. Valores de las normas para los contaminantes criterio.

Contaminante	Valor (µg/m ³) Guía OMS	Valor (µg/m ³) NOMs (México)	NOMs México
PM ₁₀	50 promedio diario. 20 promedio anua	75 promedio diario 40 promedio anual	NOM-025-SSA1-2014
PM _{2.5}	25 promedio diario 10 promedio anual	45 promedio diario 12 promedio anual	NOM-025-SSA1-2014
O ₃ (Ozono)	100 en 8 horas	149 en 8 horas	NOM-020- SSA1-2014
SO ₂ (Dióxido de azufre)	20 en 24 horas 500 en 10 minutos	288 en 24 horas 66 en promedio anual Máximo 2 veces al año	NOM-022- SSA1-2010
NO ₂ (Dióxido de nitrógeno)	40 promedio anual. 200 promedio en 1 hora. 10 en 8 horas.	395 por hora una vez al año	NOM-023- SSA1-1993
CO (Monóxido de carbono)	100 en 15 minutos. 60 en 30 minutos. 30 en 1 hora	12.6 en 8 horas máximo una vez al año	NOM-021- SSA1-1993

Propiedades y características

Se considera que el material particulado es el conjunto de partículas sólida y/o líquidas de naturaleza orgánica o inorgánica de diámetro variable, su composición química gira en torno a elementos y compuestos tales como ácidos, nitratos y sulfatos, metales y metaloides, así como y partículas sólidas y polvo suspendidas en el aire que puede ser de origen biológico. En la figura 1 se muestra el tamaño relativo del las PM₁₀ con relación a un cabello humano y a granos de arena (EPA, 2017).

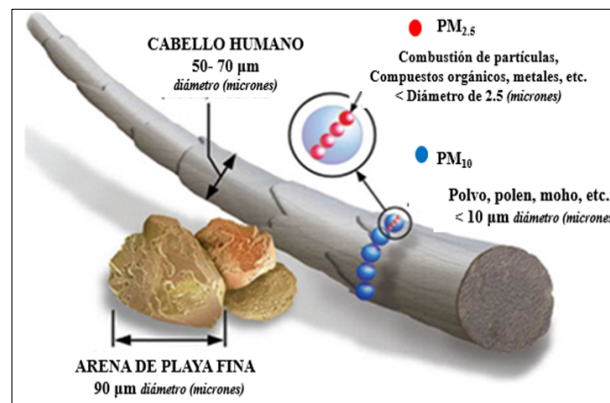


Figura 1. Dimensiones de las PM₁₀.

Debido a propiedades tales como su tamaño y densidad, el material particulado no sedimenta en períodos cortos, sino que permanece suspendido en el aire. Puede contener compuestos como: sulfatos, nitratos, iones amonio e hidrógeno, carbono y agua adherida. También puede contener una amplia variedad de elementos de la corteza terrestre como: potasio, calcio, aluminio y silicio, potasio, hierro, zinc, plomo, vanadio, titanio, cadmio, mercurio y antimonio; y algunos compuestos de mayor riesgo a la salud, como los compuestos orgánicos de elevada toxicidad, debido a su potencial efecto mutagénico y cancerígeno. Por su vertido en el aire, se le puede considerar contaminante primario cuando se emite de manera directa o puede ser considerado secundario, cuando se produce de reacciones químicas atmosféricas (Doria y Castillo, 2016).

Su tamaño y composición se pueden generar por procesos físicos, tales como la evaporación y la coagulación a través de los choques de partículas (movimiento browniano) consecuencia de la hidrodinámica de partículas y a fuerzas de origen eléctrico y/o gravitacional. El tamaño del material particulado incide en el tiempo que permanece en el aire y en la zona del organismo donde se deposita y daña (Olaya, Ovalle y Leonardo, 2017). El tamaño facilita su movilidad y su transporte por los vientos a través de largas distancias, lo que incrementa el riesgo en la salud de las personas en la región donde se forman.

Las partículas atmosféricas se consideran polimorfas, para estudiarlas se considera que tienen forma esférica y se usa el diámetro aerodinámico para definir el tamaño, el cual refiere el diámetro de una partícula de forma esférica y densidad unitaria. Las perspectivas de estudio son entre otras: concentración, permanencia y dispersión, caracterización, trayectoria cuando ingresa al cuerpo humano (Arrieta, 2016). La morfología de las partículas depende de: la composición química, la fuente emisora y la dispersión de la luz. Existe una clasificación morfológica que considera las categorías: fibrosas (partículas con longitud aproximada de 3 veces su radio, aglomerados (partículas formadas por otras partículas) esféricas e irregulares (González, 2018).

Los altos niveles de sulfato, nitrato y cloruro encontrados en las PM_{10} , se asocian con importantes emisiones de la industria petrolera, petroquímica; y el tráfico automotor en la atmósfera (Sosa et al., 2017). El excesivo transporte carretero y la ineficiencia y obsolescencia de los motores originan combustiones parciales de la gasolina y el diesel, lo que produce importantes cantidades de emisiones gaseosas de contaminantes entre los que destacan los compuestos orgánicos volátiles (VOC's), los hidrocarburos aromáticos, los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH), todos ellos representan un enorme peligro a nuestra salud, cuando se integran a las partículas atmosféricas por la facilidad con que los respiramos (Ramírez-Cando et al., 2018).

Tipos de fuentes

Las partículas atmosféricas pueden tener origen natural, proviene de desiertos, de erupciones volcánicas, de resuspensión de lugares sin pavimentar, así como de incendios forestales (Legarreta, Corral, Delgado, Torres y Juan, 2015). Pese a que la fuente sea la misma naturaleza, eso no elimina riesgos en la salud de las personas y en el equilibrio de los ecosistemas (Alimissis, et al., 2018). Los vertidos en el aire se relacionan con las estaciones del año, las condiciones meteorológicas y la ubicación geográfica de cada lugar. Otra forma de producción es a partir de aerosoles biogénicos y polvo del suelo que se incorpora al aire provocando el transporte de minerales en regiones áridas. Tal es el caso de los polvos del desierto son levantados e incorporados al ambiente y transportados desde regulares hasta grandes distancias incluso intercontinentales. Además, pueden originarse de los aerosoles que provienen de la sal marina contenida en el rocío formado por el estallido de burbujas de agua del mar de forma continua e intensa (Diapouli, Manousakas, Vratolis, Vasilatou, Pateraki, y Bairachtari, 2017).

Otra forma en que se originan las partículas atmosféricas es por las actividades antropogénicas de las zonas urbanas con elevado crecimiento demográfico e industrial, donde hay un intenso tránsito vehicular y aéreo en donde se requiere de la quema de combustibles fósiles en cantidades por demás significativas (Cáceres, 2015). Las fuentes antropogénicas se clasifican a su vez en cuatro categorías que se indican en la tabla 2.

Tabla 2. Fuentes antropogénicas de las partículas atmosféricas.

Fuente	Características	Ejemplos de actividades industriales	Referencia
Fijas	Establecimientos industriales estacionarios	Termoeléctrica, alimentos, medicamentos, bebidas y tabaco, combustibles, productos derivados del petróleo y carbón, equipo y accesorios para la industria automotriz, textil, cuero y piel, maquinaria y equipo, productos que usan minerales metálicos y no metálicos, papel, polímeros y plásticos, llantas, productos vegetales y animales.	SEMARNAT, SINAICA e INECC, 2018a).
Móviles	Transporte de toda variedad de vehículos ¹	Vehículos ligeros de gasolina, camiones y pipas, transporte urbano, motocicletas, tractocamiones a diésel, así como el transporte aéreo: aviones ² , helicópteros.	Sosa et al., 2018
De área	Conjunto de actividades y procesos relacionados con la agricultura y comercio.	Combustión de gas natural y de gas L.P. comercial y residencial; uso de solventes en aplicación de asfalto, productos de artes gráficas, tintorerías (lavado en seco), pintura automotriz de uso en las casas-habitación, y hoteles, así como uso doméstico e industrial de solventes, almacenamiento y transporte de derivados del petróleo, como: gasolina y diésel, construcción, agricultura, pirotecnia, tratamiento de aguas residuales, operación de aeronaves, travesías en caminos no pavimentados con excesivo levantamiento de polvo, bancos de arena y materiales de construcción.	Sosa et al., 2018

Dispersión

La composición química de las partículas atmosféricas depende de varios factores como la fuente de origen, las condiciones meteorológicas y geográficas del lugar. De la interacción física y química del material particulado con las sustancias químicas del aire, se llevan a cabo las reacciones con oxidantes atmosféricos, con la radiación solar y con las moléculas de vapor de agua. Las principales consecuencias de estas reacciones son las alteraciones de la radiación solar y del ciclo de vida de las nubes. Además se favorecen reacciones de naturaleza heterogénea, debido a que las partículas son medios efectivos de núcleos acarreadores de sustancias tóxicas que se estabilizan cuando se adsorben en ellas, esta estabilización hace que el proceso de dispersión sea más complicado.

Las PM₁₀ se depositan más rápido que las PM_{2.5} y otras de menores diámetros. El tipo de fuente que origina las partículas es un factor determinante en la dinámica física y química de la atmósfera y, en variables ambientales como la visibilidad y el calentamiento global (Pikridas, Vrekoussis, Sciare, Kleanthousf y Kizaszf, 2018). El tiempo de permanencia del material particulado depende de varios procesos: la precipitación o la sedimentación (Arrieta, 2016).

Otros de los factores relacionados con el tiempo de residencia de las partículas en el aire son las propiedades termodinámicas, éstas consideran la distribución másica entre las fases que integran las partículas ya que dependen de la humedad como de la temperatura, por lo que cambios de estas variables atmosféricas provocan alteraciones en la concentración del material particulado en la atmósfera. Tal es el caso de las partículas que contienen sulfatos de amonio, las cuales se puede considerar que son bajas durante el verano, pero altas en el invierno. Y la temporada de lluvia reduce la concentración de partículas, ya que por gravedad decaen cuando se integran las moléculas de agua en su masa. Cuando en la composición del material particulado predominan compuestos orgánicos, no se pueden mojar, por lo que para poder ser removidas por la lluvia sufren una oxidación en su superficie. Lo que incrementa su tiempo de residencia en la atmósfera. En caso de tener una composición predominantemente inorgánica (como es el caso de los sulfatos, nitratos y metales) el proceso de remoción se facilita al tener la capacidad de mojar su superficie (Gonzalez, 2018).

¹ Estas fuentes provocan la re-suspensión de partículas depositadas en las calles, residuos de llantas y balatas del frenado, suspensión de suelos tránsito en calles no pavimentadas, construcción y demolición de edificaciones.

² El departamento Social Europeo y la Aviación, aseguran que los aeropuertos pueden ser considerados como potenciales fuentes de contaminación atmosférica, por tener las formas de emisión: emisiones gaseosas del escape de los aviones y los motores de turbina los vertidos directos de combustible como queroseno, gasolina o diésel durante el reabastecimiento de los aviones y las partículas generadas durante los procesos de arranque y frenado donde actúan los neumáticos y el asfalto (Ramírez-Cando, et al., 2018).

Efectos en la salud

La literatura reporta el conocimiento de los efectos de las partículas por efecto de emisiones volcánicas desde el siglo 1 d. C. Se tiene evidencia de las afectaciones a la salud de las partículas, tal es el caso de afectaciones respiratorias desde el tiempo de los romanos en actividades artesanales inglesas (WHO, 2018). Las personas más vulnerables a los efectos de los contaminantes atmosféricos se localizan en zonas urbanas de elevada densidad poblacional y zonas periurbanas.

La salud incluye un conjunto de factores endógenos y exógenos que interactúan con gran número de procesos complejos que se realizan en el organismo. Por lo que se asume que las afectaciones por respirar aire contaminado están en función de factores tales como: tiempo de exposición, propiedades físicas y composición química del material particulado, condiciones meteorológicas y tipo de geografía del lugar que habitan y condiciones fisiológicas, inmunológicas y hereditarias de cada individuo. El ingreso de partículas gruesas al sistema respiratorio puede generar afectaciones a nivel superior o a nivel de la nariz y de los alvéolos cuando se trata de partículas finas (Ubilla y Johannssen, 2017).

El proceso de la respiración inicia cuando inhalamos aire a una considerable velocidad que va disminuyendo conforme llega a la cavidad de los conductos. Luego continua la travesía a los pulmones, esto ocurre a una velocidad muy pequeña, por lo que la forma en que se acumulan las partículas en estos órganos se debe a los mecanismos tales como: impacto, intercepción, sedimentación y difusión. Estos mecanismos en conjunto con otros factores como las características propias de la fisiología y estado de salud de cada persona provocan afectaciones a su salud a corto, mediano y largo plazo (Ubilla y Johannssen, 2017).

La literatura refiere daños en la mucosa de las vías respiratorias y facilidad de ingreso de alérgenos por inhalación, provocando dificultades en el sistema inmunológico y pulmonar. Henríquez y Urrea (2017) sugieren que la mayoría de los estudios epidemiológicos convergen en que el mayor impacto en la salud por partículas se debe a compuestos altamente tóxicos y carcinogénicos como el carbono en su estado elemental, a hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), sulfatos, nitratos y determinados metales pesados: Fe, Zn, Ni y Cd, entre otros. El material particulado está altamente relacionado con la incidencia del cáncer de pulmón y de vías urinarias y vejiga (WHO, 2018).

Se ha reportado una relación directa entre PM_{10} y tres posibles causas de mortalidad: respiratoria total, cardiovascular total y cardiorrespiratorias, en individuos mayores de 65 años (Son, Osornio-Vargas, O'Neill, Hystade, Texcalac-Sangrador, Ohman-Strickland, Meng y Schwander, 2018). También se han reportado posibles afectaciones a nivel cerebral debido a procesos inflamatorios, así como al sistema inmunológico en niños y jóvenes (Cano, et al 2017). Entre otros efectos están alteraciones a los sistemas: nervioso central y reproductivo, así como hospitalizaciones por urgencias (Demírtas, 2018). Además, se asocia al material particulado en el organismo con el parto prematuro, peso bajo en el nacimiento e incluso la muerte (Roviria, et al. 2018). Estudios realizados con mujeres embarazadas expuestas a elevadas concentraciones de contaminantes en el aire, revelaron que encontraron afectaciones en el ADN, por la presencia de benzopireno, que se encuentra entre los componentes orgánicos del material particulado (Amable, Méndez, Bello, Benítez, Escobar y Zamora, 2017). Investigaciones realizadas por Orioli, Cremona, Ciancarella y Solimini (2018) se enfocaron en estimar la posible relación entre la contaminación del el aire y la diabetes mellitus (DM) en Italia. Encontraron una relación considerable y significativa entre la DM y los niveles de contaminantes estudiados para distintas medidas de exposición de contaminación. La Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) sugiere que existe evidencia científica de la relación entre el cáncer y el material particulado en el aire (Ubilla y Johannssen, 2017).

La UNICEF (2016) indica que los niveles de toxicidad del aire ambiente en la mayoría de las zonas industriales a nivel mundial superan los valores límite recomendados por la OMS, estiman que uno de cada siete niños en el mundo está en riesgo por la contaminación atmosférica, lo que representa un total 300 millones de niños que respiran aire contaminado. Dicho organismo pide a los gobiernos del mundo la urgente atención a este problema de salud pública, para que mejoren sus estrategias de gestión de la calidad del aire. Les recuerda la importancia de no permitir la colindancia de industrias de ningún tipo con las casas habitación, de mejorar los procesos industriales para reducir las emisiones atmosféricas. Así como informar a las personas que habitan en zonas industriales, cuáles son las mejores formas de auto protegerse del aire contaminado que respiran, ya sea generado industrialmente en sus propias casas y de estar al pendiente de información sobre la calidad del aire exterior emitida por las autoridades ambientales y las medidas a seguir en caso de presentarse Precontingencias ambientales.

Efectos en el medio ambiente

A la fecha se tiene un mayor conocimiento los efectos en la salud de las personas que en los ecosistemas y el medio ambiente. Según Talbi et al., (2017), existen varios estudios que indican fuertes afectaciones biológicas en los seres vivos por acción de las partículas en el aire ya sea de origen natural o antropogénico.

Riojas-Rodríguez et al. (2016) asegura que los efectos producidos en el medio ambiente son difíciles de dimensionar, sin embargo, se tiene información general sobre pérdida de bosques y selvas, afectaciones al paisaje, alteraciones de la cadena alimenticia y de la fotosíntesis (alteración de la producción de oxígeno por las plantas), disminución de las especies de fauna silvestre, incremento de la erosión del suelo y, por tanto, disminución de la filtración de agua a los mantos acuíferos, alteraciones al clima, incremento del efecto invernadero, entre otros.

En regiones secas son cada día más vulnerables, a la fuerza natural del viento que causa erosión, lo que repercute en la cantidad de partículas que se producen e incorporan a la dinámica atmosférica, lo que trae como consecuencia distintos problemas en la vegetación y en la salud de los seres vivos (Van-Pelt, Baddock, Dodorico, Ravi y Bhattachan, 2017).

Los metales pesados adheridos al material particulado causan la acidificación y saturación de nitrógeno que dañan la biodiversidad y el crecimiento de la flora y la fauna, los ciclos de los nutrientes y los ciclos biogeoquímicos, con todo ello se pone en el peligro la dinámica de la cadena alimenticia. Cuando el material particulado es emitido e incorporado a la atmósfera, las partículas se transportan y depositan en la vegetación causando su degradación, esto también sucede con los lagos mares y ríos. Consecuentemente se producen ello afectaciones a la vida humana y silvestre acuática y terrestre. También se provocan alteraciones en la salinidad del suelo en la producción de follaje, flores y frutos (Legarreta, et al., 2015).

Las partículas suspendidas en el aire tienen un gran impacto en el clima, pese a que su tiempo de permanencia en el aire es menor que el de los gases efecto invernadero, señala el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), También se presentan efectos radiactivos que pueden ser directos, cuando las partículas dispersan y absorben la radiación infrarroja solar y la térmica (SEMARNAT, 2019). En el caso de los efectos indirectos que se originan cuando las partículas modifican las propiedades de la nubosidad, la concentración y las propiedades higroscópicas del material particulado, pueden alterar las propiedades físicas y las radiactivas de las nubes: luminosidad e intensidad de precipitación (Talbi et al., 2017). Por último, otro efecto negativo del material particulado está relacionado con alteraciones a los procesos bioquímicos de la vida acuática y la intensificación de la eutrofización, lo que ha generado un mayor interés por este tipo de estudios (Xu, et. Al., 2018).

Otros efectos

Además de la salud, otras afectaciones importantes para la población está el aspecto económico en el que se integran los gastos por tratamientos médicos y hospitalización por enfermedades respiratorias y cardiovasculares y, en ocasiones pérdidas de capital humano, ausentismo laboral y académico, lo que trae como consecuencia la caída en la productividad de la población en su participación en las actividades económicas. Lo que afecta el bolsillo de los ciudadanos cuando no tienen acceso a una seguridad médica laboral o en su caso, afectaciones económicas al presupuesto gubernamental al tratar de compensar los daños a la salud y a la falta de productividad (IMCO, 2013). Por último, existen otros efectos por daños físicos a edificaciones, estatuas y monumentos que son importantes para la sociedad porque son considerados culturalmente como patrimonio de la humanidad.

Conclusiones

La amplia variedad de reportes de investigaciones científicas en diversas partes del mundo, muestran la peligrosidad del material particulado en el aire. Coinciden en la importancia de medir y controlar las emisiones de material particulado y otros contaminantes criterio, para ajustarlos a los valores recomendados por la OMS y que cada gobierno aterriza en sus propias normas oficiales de calidad del aire. Se reconoce que la humanidad tiene el enorme reto de mejorar las estrategias que conduzcan a lograr que respiremos aire limpio. Queda mucho por conocer y por hacer para salvaguardar la salud y la calidad de vida de las personas y la

estabilidad del equilibrio ecológico por elevado crecimiento industrial, poblacional y la movilidad que demandan las actividades propias de la sociedad moderna. Las acciones por las que se mide la calidad del aire en las zonas industriales no han sido suficientes para reducir el riesgo de afectaciones a la salud de la población. Una importante cantidad de personas desconoce información elemental sobre la contaminación atmosférica, es necesario incrementar las estrategias de difusión para informar a la población qué sucede en el aire por las emisiones atmosféricas, como estar informados para autoprotegerse. Se están dejando de lado las restricciones gubernamentales que deben exigir el cumplimiento de las concentraciones de los contaminantes criterio pese al creciente número de víctimas mortales por exposición a la insalubridad del aire.

Bibliografía/Referencias

- Alimissis, A., Philippopoulos, K. y Deligiorgi, D. (2018). Spatial estimation of urban air pollution with the use of artificial neural network models. *Atmospheric Environment* 191 (2018) 205–213.
- Amable, I., Méndez, J., Bello, B., Benítez, B., Escobar, L. y Zamora, R. (2017). Influencia de los contaminantes atmosféricos sobre la salud. *Revista Médica Electrónica*, 39 (5), 2470-3610.
- Arrieta, A. (2016). Dispersión de material particulado (pm10), con Interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*. (16) 2, 43-54.
- Cáceres, D. L. (septiembre de 2015). Tesis Doctoral. Evaluación de los efectos agudos en la función pulmonar por exposición a material particulado fino en niños que viven próximos a una playa masivamente contaminada con relaves mineros, Chañaral, Chile. Cerdanyola del Vallés, Barcelona, España: Universidad Autónoma de Barcelona.
- CEMDA. (2016). Los derechos humanos y la calidad de aire en México. CDMX: Hewlett Foundation.
- Demirtas, M. (2018). A comprehensive overview of pm10 levels in Istanbul: annual and seasonal spatio-temporal variations and the long-distance transport. *Anadolu University Journal of Science and Technology Applied Sciences and Engineering*, 19 (1), 210-234.
- Diapouli, E., Manousakas, M., Vratolis, S., Vasilatou, V., Pateraki, S. y Bairachtari, K. (2017). AIRUSE-LIFEC: estimation of natural source contributions to urban ambient air PM10 and PM2.5 concentrations in southern Europe – implications to compliance with limit values. *Atmospheric Chemistry Physics*, (17) 3673-3685.
- Doria, C. y Castillo, J. (2016). Caracterización química de material particulado PM10 en la atmósfera de La Guajira, Colombia. *Química Aplicada y Analítica*, 45 (2) 19-29.
- EPA. (19 de January de 2017a). Particulate Matter (PM) Pollution. Obtenido de <https://www.epa.gov/pm-pollution>.
- González, L. T. (2018). Tesis Doctoral. Caracterización química y morfológica del material particulado suspendido del área metropolitana de monterrey y sus posibles fuentes de emisión. Nuevo León. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey.
- Henríquez, G. y Urrea, C. (2017). Material particulado y gases contaminantes en la comuna de El Bosque ¿cuánto influyen en la cantidad de consultas por enfermedades respiratorias? *Revista Médica de Chile*, 145, 1371-1377.
- IMCO. (24 de septiembre de 2013b). La contaminación del aire: un problema que daña la salud y la economía. Obtenido de ¿Cuánto nos cuesta la contaminación en México?: <https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2013/09/Anexo-Metodo%C3%B3gico-24Sep13.pdf>.
- Legarreta, A., Corral, A. Y., Delgado, M., Torres, J. y Juan, F. (2015). Material particulado y metales pesados en aire en ciudades mexicanas. *Culcyt/Medioambiente*, 12 (56) 234-245.
- Olaya, J., Ovalle, D. y Leonardo, C. (2017). On the PM2.5/PM10 fraction estimation. *Revista DYNA*, 84 (203) 343-348.
- Orioli, R., Cremona, G., Ciancarella, L. y Solimini, A. (2018). Association between PM10, PM2.5, NO2 and O3. *PLOS ONE*, 13 (1), 1-17.
- Pateraki, S., Manousakas, M., Bairachtari, K., Kantarelou, V., Eleftheriadis, K. y Vasilakos, C. (2019). The traffic signature on the vertical PM profile: Environmental and health risks within an urban roadside environment. *Science of the Total Environment*, 646 (2019) 448-459.
- Pikridas, M., Vrekoussis, M., Sciare, J., Kleanthous, S., Vasiliadou, E. y Kizas, C. (2018). Spatial and temporal (short and longterm) variability of submicron, fine and sub-10 μ m particulate matter (PM1, PM2.5, PM10) in Cyprus. *Atmospheric Environment*, 191 (2018) 79–93.
- Ramírez-Cando, L., Armijos, M., Crespo, M., Pino-Casignia, S. y Álvarez-Mendoza, C. (2018). Modelamiento geoestadístico de mediciones de concentración de material particulado (PM10) para la validación de un método simplificado. *Anales Científicos*, 79 (1), 81-91.
- Riojas-Rodríguez, H., Soares, A., Texcalac- Sagrador, J. y Moreno, L. (2016). Air pollution management and control in Latin America and the Caribbean implications for climate change. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 40 (3), 150-59.
- Rovira, J., Sierra, J., Nadal, M., Schuhmacher, M. y Domingo, J. (2018). Main components of PM10 in an area influenced by a cement plant in Catalonia, Spain: Seasonal and daily variations. *Environmental Research*, (165) 201-209.

- SEMARNAT. (25 de julio de 2019). Estrategia Nacional para Mejorar la Calidad del Aire. Obtenido de Programas de gestión para mejorar la calidad del aire ProAire: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire>.
- SEMARNAT, SINAICA e INECC. (18 de marzo de 2018a). Manuales de la calidad del aire. Obtenido de Manual 1. Principios de medición de la calidad del aire: <http://sinaica.inecc.gob.mx/pags/guias.php>.
- Son, Y., Osornio-Vargas, A. R., O'Neill, P., Hystade, M., Texcalac-Sangrador, J. L., Ohman-Strickland, P., Meng, Q. y Schwander, S. (2018). Land use regression models to assess air pollution exposure in Mexico City using finer spatial and temporal input parameters. *Science of the Total Environment* 639 (2018) 40–48.
- Sosa, B., Porta, A., Colman, J., Banda, R. y Massolo, L. (2017). Human health risk due to variations in PM10-PM2.5 and associated PAHs levels. *Atmospheric Environment*, 1-22.
- Stafoggia, M., Schwartz, J., Badaloni, C., Bellander, T., Alessandrini, E., Cattani, G. y de' Donato, F. (2016). Estimation of daily PM10 concentrations in Italy (2006–2012) using finely resolved satellite data, land use variables and meteorology. *Environment International*, 1-13.
- Talbi, A., Kerchich, Y., Kerbachi, R. y Boughedaoui, M. (2017). Assessment of annual air pollution levels with PM1, PM2.5, PM10 and associated heavy metals in Algiers, Algeria. *Environmental Pollution*, 1-12.
- Ubilla, C. y Yohannssen, K. (2017). Contaminación atmosférica. Efectos en la salud respiratoria en el niño. *Revista Médica Condes*, 28 (1), 11-118.
- UNICEF. (31 de october de 2016). For every child. Obtenido de Pollution: 300 million children breathing toxic air - UNICEF report: <https://www.unicef.org/es/comunicados-prensa/300-millones-ni%C3%B1os-aire-t%C3%B3xico-contaminaci%C3%B3n-UNICEF>.
- Van Pelt, R., Baddock, M., Dodorico, P., Ravi, S. y Bhattachan, A. (2017). Total, vertical sediment flux and PM10 emissions from disturbed Chihuahua Desert surfaces. *Geoderma*, 293 19-25.
- WHO. (2 de mayo de 2018). Ambient (outdoor) air quality and health. Obtenido de [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- Xu, S., Zou, B., Shafi, S. y Sternberg, T. (2018). A hybrid Grey-Markov/ LUR model for PM10 concentration prediction under future urban scenarios. *Atmospheric Environment*, 187 (2018) 401–409.