

¿Sabías que el clima del planeta

depende de los aerosoles?

Yedid Zambrano Medina
Francisco Amador-Cruz
Luis Alberto Rendón

marco.mora@correo.buap.mx

Los aerosoles y sus fuentes de emisión

El aire de la atmósfera está constituido por un 79 % de Nitrógeno, 21 % de Oxígeno y, del uno por ciento restante, por una serie de gases raros como el Argón (Ar), el Helio (He) y el Hidrógeno (H_2) y, en mucha menor proporción, por otros gases como los denominados gases de efecto invernadero entre los que destacan el dióxido de Carbono (CO_2) y el Metano (CH_4). Pero también, además de gases, en la atmósfera hay aerosoles, que se definen como partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, y que aun cuando son mucho más grandes que los gases, pueden penetrar el tracto respiratorio y digestivo y penetrar en los organismos, causando muchas veces daños celulares y por ende problemas en salud, ocasionando muertes prematuras en el mundo.

Entonces, los aerosoles, son partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire que se pueden catalogar de acuerdo con su origen, ya sea humano (antropogénico) o natural (Andrae et al., 1997). En el caso de los aerosoles de origen antropogénico tenemos ejemplos como el humo del cigarro, el humo que proviene de la quema de leña o carbón, el humo que es producto de la quema de combustibles fósiles como el que se generan de los escapes de los automóviles, los fertilizantes que se rocían a las plantas, el humo de una carne asada, emisiones de las chimeneas de las fábricas, o el polvo que se genera cuando ranuran el concreto en las calles. Por otra parte, las fuentes naturales de aerosoles son, por ejemplo, las emisiones de polvo y ceniza del volcán Popocatepetl, el humo de los incendios de los bosques, el ahora más o menos bien conocido polvo que llega a México desde otro continente, y por ejemplo una fuente natural de aerosoles que casi nadie adivina es el mar pero que es sumamente importante en la regulación del clima del planeta. Si, de hecho, el mar genera aerosoles marinos, cuando las olas del mar chocan entre sí y producen un jet o chorro de agua que forma gotitas de agua que flotan en el aire (un aerosol). Este fenómeno, es muy importante para que se puedan producir nubes; resulta que las gotas de agua de mar contienen elementos químicos (sulfatos) que promueven la formación de nubes. En fin, estos son ejemplos de fuentes de generación (humana o natural) de aerosoles. En la siguiente sección de este artículo veremos que también es posible que los aerosoles se formen a partir de reacciones químicas entre elementos presentes en la atmósfera y bajo ciertas condiciones ambientales.



Por diversas razones, las partículas (líquidas o sólidas) que componen a los aerosoles se clasifican de acuerdo con su tamaño en tres categorías. Por ejemplo, las *partículas gruesas* o PM_{10} tienen un diámetro de hasta $10\ \mu\text{m}$, recordando que un micrómetro es igual la millonésima parte de un metro ($1 \times 10^{-6}\ \text{m}$) y entre ellas podríamos mencionar granos de arena de la playa o del desierto. Comúnmente las PM_{10} tienen sus fuentes de emisión en la combustión, el polvo de los caminos y los incendios, entre otros. Hay partículas más pequeñas, que se denominan *partículas finas* y que fácilmente pueden ser inhaladas y penetrar hasta los pulmones y el sistema circulatorio. Dichas partículas tienen diámetros menores a $2.5\ \mu\text{m}$ y sus principales fuentes de emisión constituyen cualquier actividad que queme combustibles fósiles o biomasa, como en los incendios forestales. Es difícil imaginar que tan pequeñas pueden ser estas partículas, por eso en la Figura 1 se presentan los tamaños relativos de las PM_{10} y $PM_{2.5}$ en comparación con el tamaño de un cabello humano. Nótese que un cabello humano tiene un diámetro de entre $50\text{-}70\ \mu\text{m}$, y que a lo largo de este diámetro podrían caber hasta cinco esferas de diámetro menor a $10\ \mu\text{m}$, es decir a lo largo del diámetro de un cabello humano cabrían cinco partículas de tamaño PM_{10} representadas con los círculos en amarillo. A su vez, en una partículas PM_{10} cabrían cuatro partículas $PM_{2.5}$.

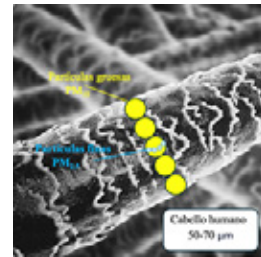


Figura 1. Imagen de un cabello humano de diámetro entre $50\text{-}70\ \mu\text{m}$, donde podrían caber hasta cinco esferas (amarillo) que representan el tamaño de una partícula gruesa (PM_{10}). A su vez en el diámetro de una partícula gruesa cabrían hasta cuatro partículas finas ($PM_{2.5}$).

Es necesario enfatizar la variación de tamaños de las partículas que componen a los aerosoles, ver Figura 2. Además de las partículas finas, existen unas todavía más pequeñas, que son las denominadas partículas ultrafinas, o $PM_{1,0}$ que son todas aquellas fracciones de algún material que tengan diámetros menores a $1 \mu m$, tan pequeñas como el tamaño de un virus. Continuando en la escala de tamaños, podríamos pensar que después de las partículas del tamaño de un virus, tendríamos fracciones de materia de humo de los incendios, o más grandes como las bacterias (que son diminutas), o mucho más grandes como el polen hasta llegar al tamaño de un cabello humano. Para darnos una buena idea de

cuanto varía el tamaño de las partículas, multiplicamos por el mismo factor a cada uno de los tamaños de los elementos que aparecen la figura 2. En este caso el virus del Zika tendría un tamaño de un chícharo, el coronavirus tendría el tamaño de una pelota de golf, las bacterias más pequeñas serían como del tamaño de la estatura de una persona, los granos de polen tendrían las dimensiones de una habitación y finalmente el cabello humano, sería del tamaño de un edificio de 20 pisos. En este sentido es claro que las partículas que componen a los aerosoles tienen una variación muy grande de sus dimensiones.

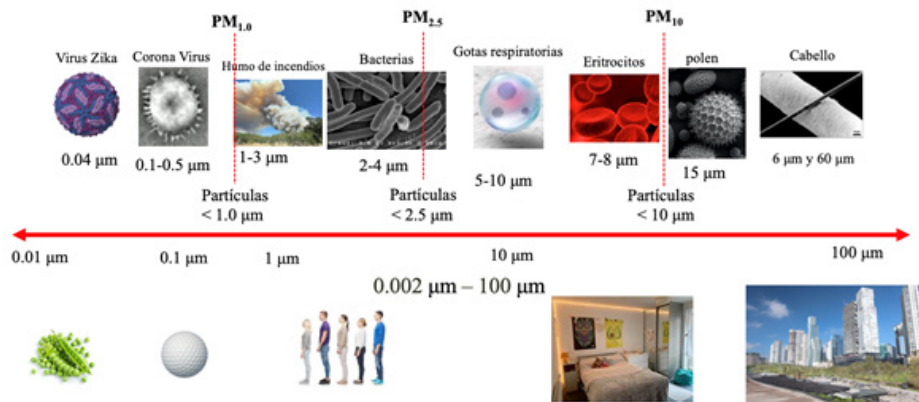


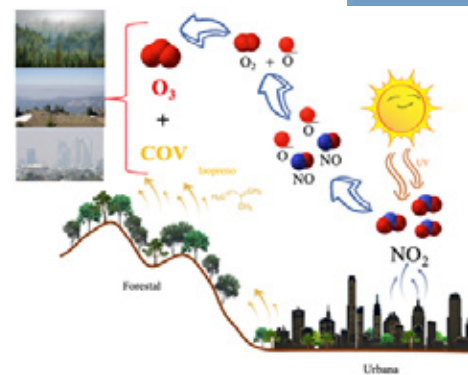
Figura 2. Ejemplos de elementos (virus, humo, bacterias, gotas, etc.) para ejemplificar los tamaños de las partículas de aerosoles, excepto por los eritrocitos, todos estos elementos se pueden encontrar en el aire. En la parte de abajo se muestran

Ahora hablemos de cuánto tiempo los aerosoles permanecen en la atmosfera (Jia, 2014). Por ejemplo, sabemos por las noticias que, en la ciudad de Cancún, han ocurrido episodios donde el cielo se torna rojizo, esto se debe a la presencia de partículas de polvo y arena que son transportadas desde el desierto del Sahara en África, lo cual significa que algunos aerosoles pueden permanecer hasta meses en la atmosfera. En el caso de las gotas de saliva que expulsamos cuando respiramos, hablamos, o gritamos, sabemos que el tiempo que permanecen en el aire es del orden de semanas u horas dependiendo de las condi-

ciones ambientales. Este dato fue determinante para establecer medidas para mitigar el contagio de casos de COVID-19 durante la pandemia, ya que como recordaremos se determinó que una de las principales vías de contagio o de propagación del virus era la vía aérea. Se recomendaba ventilar bien los espacios, para propiciar que los aerosoles (gotas de saliva) se depositaran lo más pronto posible. El depósito de los aerosoles depende en gran medida de la humedad y el viento (Ramanathan et al., 2001). En fin, que el tiempo de vida de los aerosoles en la atmosfera, va desde los minutos hasta los meses.

Formación de aerosoles

Es muy importante resaltar que, dentro de la complejidad del tema de los aerosoles, su presencia en la atmosfera no solamente se explica por las fuentes de emisión de estos, como las que ya se han comentado, sino que también se pueden formar a partir de reacciones químicas. Ahora comentaremos sobre un ejemplo de un conjunto de “cosas” (mecanismo químico) que podrían ocurrir en el aire que se intercambia entre una ciudad y una zona de bosques. La historia de la fisicoquímica de este mecanismo de formación de los aerosoles comienza con las emisiones vehiculares de dióxido de nitrógeno (NO_2) en los centros urbanos, el NO_2 es una molécula que posee dos átomos de oxígeno y uno de nitrógeno. Sin embargo, en presencia de la luz del sol, se puede desprender un átomo de oxígeno ($\text{NO}_2 + \text{luz} \rightarrow \text{NO} + \text{O}$), que rápidamente interactúa con el aire que está en la atmosfera que es rico en oxígeno molecular (O_2) y entonces se combina químicamente ($\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_3$) para formar una molécula con tres oxígenos, es decir ozono (O_3). Esto significa que las emisiones de los vehículos son precursoras de la formación de ozono, que es un contaminante secundario -que se formó a partir de las emisiones vehiculares. Ahora bien, mientras esto sucede en el aire de una zona urbana, en el bosque huele muy bien. Si, el bosque tiene un olor muy peculiar, los pinos tienen un olor tan característico que incluso se ha copiado este olor en aromatizantes, o productos de limpieza. Pero ¿qué les da este olor tan característico a los pinos? La respuesta es que los pinos contienen sustancias llamadas *terpenos*, y estos pertenecen a un grupo denominado compuestos orgánicos volátiles (COV). De manera que los bosques de pino emiten COV. Bueno, pues el ozono que se formó en las zonas urbanas puede reaccionar casi inmediatamente con las emisiones de COV de los bosques y formar aerosoles. Esta una de las maneras, no la única, que explica porque vemos neblinas en los bosques. Para el lector interesado, en replicar este mecanismo de formación de aerosoles en el laboratorio universitario se puede consultar a Mora-Ramírez et al., (2023).



la
es.

Aerosoles y el clima del planeta

Si bien es cierto, la mayoría de nosotros hemos escuchado que los gases de efecto invernadero (GEI) producen el calentamiento del planeta, realmente muy pocos saben que los aerosoles contribuyen al enfriamiento del planeta (Haywood et al., 2016). Por ejemplo, en el contexto dramático del calentamiento global, las erupciones volcánicas no son el villano de esta obra dramática. En 1991 el Monte Pinatubo en Filipinas hizo erupción lo que provocó que la tierra se enfriara por algunos años. La erupción libero grandes cantidades de aerosoles a la capa más alta de la atmosfera, la cual “bloquea” la luz del sol y redujo la cantidad de energía que llegaba hasta la superficie de la tierra. Para calcular la diferencia entre la cantidad de energía que la Tierra refleja hacia el espacio y la energía que recibe del sol se emplea la variable llamada el *forzamiento radiativo*, como una medida de los cambios que pudiera sufrir el balance de la energía de la Tierra y como esta anomalía podría contribuir al cambio climático. La figura 4 presenta los valores de forzamiento radiativo a nivel global estimados desde 1750 hasta 2005. Los valores del forzamiento radiativo



para GEI como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) aparecen en rojo por tener valores positivos de forzamiento radiativo, lo que significa que contribuyen al calentamiento del planeta. Sin embargo, podemos apreciar que existen barras en azul, porque tienen valores negativos de forzamiento radiativo, lo cual significa que contribuyen al enfriamiento del planeta. Estas barras en azul corresponden al total de aerosoles de origen humano presentes en la atmosfera. Ahora, notemos que cada una de estas barras de color rojo o azul, tiene unas pequeñas líneas horizontales, estas corresponden al error o incertidumbre. Por ejemplo, para el caso del CO₂, se tiene un valor positivo de forzamiento radiativo de 1.6 W m⁻² y unas barras de error de tamaño 0.4W m⁻². Pero en el caso de los aerosoles, en azul, las barras de error o incertidumbre son más grandes que la medición misma. Esto significa que no hay tanta certeza en el valor del forzamiento radiativo para el caso de los aerosoles. Esto se debe a que las partículas de aerosoles, tienen una variación muy amplia de sus tamaños, que los tiempos de vida en la atmosfera varían de minutos hasta meses, y que además de ser emitidos por diversas fuentes, pueden generarse a partir de elementos que estén en la atmosfera. El que el parámetro de forzamiento radiativo tenga mucha incertidumbre, provoca que los modelos del clima, para pronosticar por ejemplo la temperatura promedio del planeta en 2025, también tengan incertidumbre.

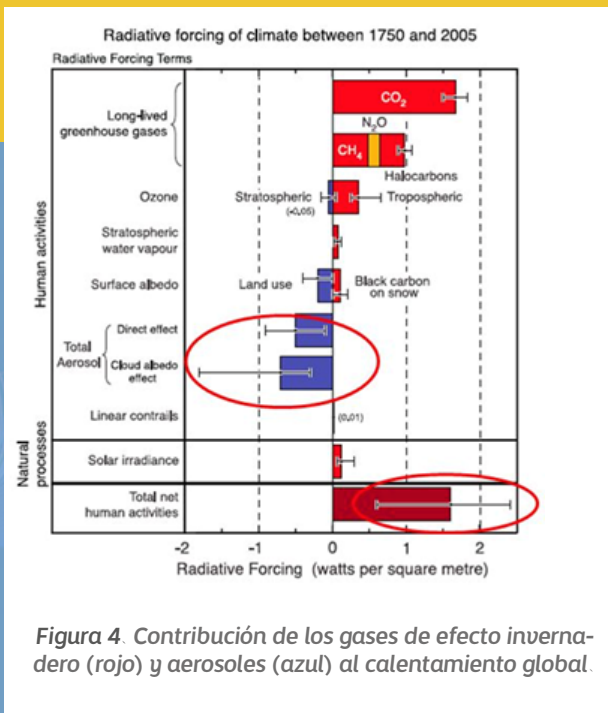


Figura 4. Contribución de los gases de efecto invernadero (rojo) y aerosoles (azul) al calentamiento global.

En conclusión, los tiempos de residencia de los aerosoles en la atmósfera, que van de días hasta meses, así como las diversas formas y tamaños que las partículas tienen, las diversas fuentes tanto naturales como antropogénicas que los emiten, pero también los mecanismos fisicoquímicos por los cuales se forman hacen que la investigación sobre el tema de los aerosoles sea un tema que hoy en día presenta un reto para los investigadores en todo el mundo. De hecho, la mejora de los modelos de pronóstico global de la temperatura del planeta depende de mejorar el conocimiento acerca de los aerosoles, reduciendo la incertidumbre, o falta de certeza en varios aspectos sobre los aerosoles. Por esta razón creemos que es necesario aumentar el número de investigaciones acerca de este tema.

Referencias

Andreae, M. O., & Crutzen, P. J. (1997). Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. *Science*, 276(5315), 1052–1058. <https://doi.org/10.1126/scien-ce.276.5315.1052>

Haywood, J. (2016). Atmospheric Aerosols and Their Role in Climate Change. In *Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth: Second Edition* (pp. 449–463). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63524-2.00027-0>

Jia, G. (2014). Atmospheric Residence Times of the Fine-aerosol in the Region of South Italy Estimated from the Activity Concentration Ratios of $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ in Air Particulates. *Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques*, 5(6), 1–9. <https://doi.org/10.4172/2155-9872.1000216>

Mora-Ramírez, M.A., Jenaro Matamoros Reyes, and Luis Alberto Rendón Delgado. 2023. "Aerosoles Atmosféricos. Relevancia En El Clima Del Planeta y Un Experimento Demostrativo Sobre Su Formación En La Interfaz Urbano-Forestal." *RD-ICUAP Año 9* (26): 11–19. <https://doi.org/ISSN 2448-5829>

Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., & Rosenfeld, D. (2001). Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science* (New York, N.Y.), 294(5549), 2119–2124. <https://doi.org/10.1126/scien-ce.1064034>