

Aportaciones para la enseñanza de la química con orientación hacia la protección ecológica. Éste es el primer artículo original en esta revista para celebrar el lanzamiento de la Década de la Educación por un Futuro Sostenible (2005-2014).

Aire y algo más...

*Dara Salcedo**

Introducción

“El aire es una mezcla de gases que componen la atmósfera de la Tierra”, se lee en un diccionario. Sin embargo, en el aire hay mucho más que gases. Por ejemplo, al mirar hacia la luz que proyecta una película sobre la pantalla del cine, se observan pequeñas partículas flotando. Esas partículas y muchas más (son tan pequeñas que no se pueden ver a simple vista) son los aerosoles atmosféricos. Ejemplos de aerosoles son las nubes y la niebla, que están formadas de gotas agua de alrededor de 10 μm de diámetro. Otro ejemplo de aerosoles son las partículas de carbón elemental que se encuentran en el humo que emite una fogata o el escape de un camión diesel y que le dan el color negro. En ciudades con problemas de contaminación también se encuentran altas concentraciones de partículas las cuales, aunque no se pueden distinguir a simple vista (tienen menos de 2.5 μm de diámetro), causan que la visibilidad sea muy baja debido a que dispersan la luz muy eficientemente.

Los aerosoles son tan importantes en la atmósfera de la Tierra que sin ellos el planeta no sería lo que conocemos: el clima sería otro, la composición de la atmósfera sería diferente, y nos perderíamos de espectáculos naturales como el arco iris y los atardeceres. Una fracción considerable de los aerosoles en la atmósfera son de origen natural (producto de actividad biológica, volcanes, rompimiento de olas, erosión eólica); sin embargo, las actividades humanas también generan una gran cantidad de ellos (principalmente por la quema de combustibles) y pueden llegar a afectar su concentración natural con efectos importantes sobre el clima y la salud humana. Por todo esto, es importante caracterizar las fuentes y las propiedades de los aerosoles atmosféricos, así como entender los procesos en los que participan.

En este trabajo se hace un resumen de las propiedades de los aerosoles (composición, tamaño, concentración, fuentes y sumideros) y del papel que juegan en los procesos atmosféricos, mencionando los efectos negativos que puede tener la emisión antropogénica de partículas a la atmósfera.

Aerosoles atmosféricos

Un aerosol está formado por partículas, sólidas o líquidas, dispersas en un gas. Estrictamente hablando, un aerosol incluye al gas y a las partículas. Sin embargo, en Química Atmosférica, la palabra “aerosol” generalmente se refiere sólo a la materia condensada. A los aerosoles también se les suele llamar material particulado o PM (por las siglas en inglés de “particulate matter”). Los aerosoles en la atmósfera se suelen clasificar de acuerdo con su tamaño, composición u origen. La tabla 1 resume las clasificaciones más usadas.

Se consideran aerosoles atmosféricos a las partículas con un diámetro desde unos cuantos nanómetros hasta decenas de micrómetros. Las partículas con diámetros mayores que 100 μm caen muy rápidamente a la superficie de la Tierra por gravedad, por lo que permanecen muy poco tiempo en la atmósfera y no son consideradas aerosoles. Generalmente se denominan “partículas finas” a partículas con diámetros menores que 1 μm ó 2.5 μm y “partículas gruesas” a las partículas más grandes. El término “partículas ultrafinas” se usa para partículas menores que 0.1 μm . También es común utilizar los términos PM₁, PM_{2.5} y PM₁₀ que corresponden a aerosoles con partículas menores que 1 μm , 2.5 μm y 10 μm , respectivamente.

La concentración de los aerosoles en la tropósfera¹ varía dependiendo de la latitud, altitud, época del año y ambiente. Su concentración en masa puede variar entre 1 a 50 $\text{g } \mu\text{m}^{-3}$; sin embargo, es común que se observen concentraciones de 100 μgm^{-3} o más

* Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos 62209.

Correo electrónico: dara@ciq.uaem.mx
Trabajo invitado por el director de la revista.

¹ Tropósfera: es la capa más baja de la atmósfera; se encuentra directamente sobre la superficie de la Tierra y se extiende hasta aproximadamente 20 km.

Tabla 1. Clasificación de aerosoles atmosféricos.

por tamaño		por composición			por origen
		aerosoles orgánicos			
		carbón elemental	también llamado hollín o carbón negro	origen primario	
		compuestos orgánicos	hidrocarburos de cadena larga, ácidos carboxílicos y dicarboxílicos, cetonas, aldehídos, grupos nitro, aminas, aromáticos	origen primario (combustión, actividad biológica) o secundario	aerosoles primarios emitidos directamente en la atmósfera
partículas ultrafinas ($< 0.1 \mu\text{m}$)	origen secundario (nucleación)				
partículas finas ($< 1 \text{ ó } 2.5 \mu\text{m}$)	origen primario (combustión) o secundario (condensación)				
		aerosoles inorgánicos			aerosoles secundarios
partículas gruesas ($> 1 \text{ ó } 2.5 \mu\text{m}$)	origen primario (erosión, resuspensión de polvo, desgaste de piezas industriales)	iones	sulfato, nitrato, amonio, sodio, cloruro	origen secundario	conversión gas-partícula (nucleación o condensación de gases semivolátiles)
		provenientes de la corteza	óxidos y silicatos	origen primario (erosión y resuspensión de polvo)	
		metales	K, Mg, Al, Fe, Zn, V, Cu	origen primario (combustión, resuspensión de polvo, desgaste de piezas metálicas)	

en áreas urbanas contaminadas (Seinfeld y Pandis, 1998). La tabla 2 indica los rangos de valores que tiene la concentración de aerosoles en diversos ambientes. La concentración en número de partículas en regiones remotas es muy variable puesto que depende del transporte desde otras regiones, o de la existencia de fuentes naturales cercanas como volcanes activos o bosques. Las partículas en regiones remotas generalmente son pequeñas ($< 2.5 \mu\text{m}$) por lo que, aun cuando el número de partículas es elevado, la concentración en masa es baja. Por el contrario, los aerosoles en regiones marinas son más grandes ($2.5 - 10 \mu\text{m}$) por lo que, aunque su concentración en número es más baja, la concentración en masa es más alta. La concentración de partículas, tanto en número como en masa, en zonas rurales y, especialmente, en regiones urbanas es alta debido a actividades humanas, como quema de combustible y uso de disolventes, las cuales emiten partículas o gases precursores de partículas a la atmósfera.

En general, los aerosoles atmosféricos son mezclas muy complejas de cientos de compuestos orgánicos e inorgánicos (tabla 1). Además de agua, una parte importante de los aerosoles contiene iones como sulfato, nitrato, sodio y cloruro. Generalmente, los aerosoles también contienen material proveniente de la corteza terrestre como óxidos, silicatos y metales tales como potasio, magnesio, aluminio, hierro y zinc, entre otros. Finalmente, los aerosoles también contienen compuestos de carbón que incluyen carbón elemental y compuestos orgánicos (Pöschl, 2005). La composición específica de los aerosoles depende de su origen y de su historia en la atmósfera y determina sus propiedades físicas y químicas.

La figura 1 muestra la composición de P_{10} determinada con un Espectrómetro de Masas para Aerosoles (AMS por sus siglas en inglés, Canagaratna *et al.*, 2006) en diferentes sitios. Es importante notar que, dadas las características del AMS, los

componentes no-refractarios² no son detectados. En la figura se puede observar que la composición de PM₁ en la Ciudad de México está dominada por compuestos orgánicos, puesto que la principal fuente de aerosoles es la quema de combustible por vehículos automotores (Salcedo *et al.*, 2006). Por otro lado, en Langley, un área rural cerca de Vancouver, Canadá, la fracción de sulfato es más importante que en la Ciudad de México puesto que el SO₂ emitido en el área metropolitana de Vancouver es convertido en sulfato mientras es transportado hacia Langley (Boudries *et al.*, 2004). En la Costa Norte de Creta, Grecia, en donde el aire proveniente del norte contiene contaminantes producidos por la quema de combustible y biomasa en Turquía, Grecia y el Mar Negro, el sulfato es el componente más importante (Schneider *et al.*, 2004). Las diferencias en la composición de aerosoles observadas en la Ciudad de México, Langley y Creta reflejan la variación en la composición de los combustibles usados en diferentes regiones del mundo. Finalmente, la figura 1 muestra la composición de aerosoles detectados durante la quema de fuegos artificiales en la celebración del año nuevo 2005 en Mainz, Alemania. Estos aerosoles presentan una composición con altas concentraciones de potasio y cloro, debido a los compuestos que se utilizan en la fabricación de los fuegos (Drewnick *et al.*, 2006).

La fracción orgánica de los aerosoles es actualmente el foco de atención de un número importante de investigadores porque puede abarcar una porción sustancial de la masa de los aerosoles (con valores de 20% en sitios continentales hasta 90% en bosques tropicales) (Jacobson *et al.*, 2000; Kanakidou *et al.*, 2005). Dicha fracción está compuesta por carbón elemental y compuestos orgánicos. En la atmósfera, el carbón elemental generalmente está recubierto por compuestos orgánicos; aunque estos compuestos también se pueden encontrar en ausencia del carbón elemental. La caracterización de los compuestos orgánicos presentes en las partículas no es una tarea fácil, puesto que en el aerosol existen miles de compuestos orgánicos con grupos funcionales diferentes. Algunas de las familias de compuestos orgánicos que se encuentran en los aerosoles son hidrocarburos de cadena larga, ácidos carboxílicos y dicarboxílicos,

Tabla 2. Concentración en masa típica de aerosoles troposféricos en diferentes regiones (Seinfeld y Pandis, 1998).

Región	Concentración en número (m ⁻³)	Concentración en masa de PM ₁ (µg m ⁻³)
Remota (libre de fuentes antropogénicas)	50 - 10,000	0.5 - 2.5
Marina	100 - 400	1 - 4
Rural	2,000 - 10,000	2.5 - 8
Urbana	10 ⁵ - 4×10 ⁶	30 - 150

cetonas, aldehídos, grupos nitro, aminas, aromáticos y aromáticos policíclicos (Jacobson *et al.*, 2000; McMurry *et al.*, 2004).

Fuentes y sumideros de aerosoles atmosféricos

Los aerosoles tienen su origen en una gran variedad de fuentes naturales y antropogénicas. Los aerosoles primarios son emitidos directamente en la atmósfera como líquidos o sólidos. La tabla 3 compara las emisiones de las principales fuentes globales de aerosoles atmosféricos tanto naturales como antropogénicas. El polvo mineral principalmente proviene de los desiertos, los lagos secos y las franjas de climas semi-áridos, todas las cuales son fuentes naturales. Sin embargo, existen ciertas regiones cuya vegetación ha disminuido debido a la actividad humana y que también son fuentes de polvo mineral. Por ello, algunos autores consideran que hasta el 50% de las

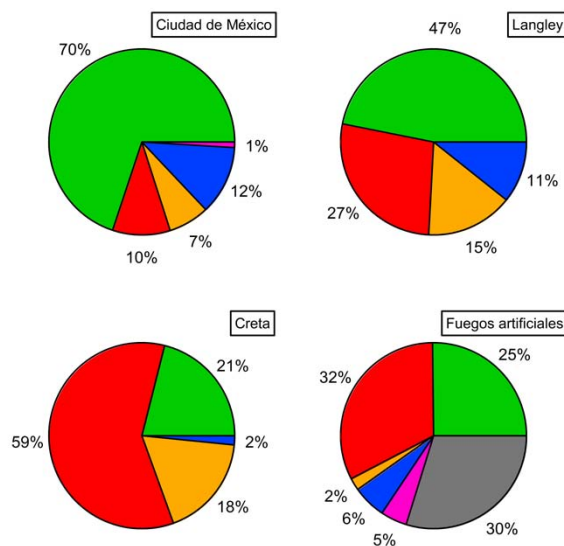


Figura 1. Composición de PM₁ medido con un Espectrómetro de Aerosoles medido en diferentes sitios.

² Compuestos no refractarios: que se evaporan a temperaturas mayores que 800°C; ejemplos de estos compuestos son el carbón elemental y el cloruro de sodio.

emisiones de polvo mineral deben ser consideradas antropogénicas (Tegen y Fung, 1995). Los aerosoles de sal marina se forman principalmente por el rompimiento de burbujas de aire durante la formación de la espuma de mar. El polvo industrial tiene su origen en la industria del transporte, combustión de carbón, manufactura de cemento, industria metalúrgica e incineración de desechos. Las principales fuentes de aerosoles orgánicos primarios (tanto compuestos orgánicos, como carbón elemental) son la quema de combustibles fósiles y de biomasa (IPCC, 2001).

Las partículas secundarias se forman por conversión de gases a partículas en la atmósfera. Este último proceso generalmente ocurre a partir de gases precursores de aerosoles que se transforman en la atmósfera por procesos químicos o fotoquímicos para formar especies poco volátiles que se condensan en partículas preexistentes o que forman nuevas partículas por nucleación. Entre los gases precursores más importantes se encuentran el SO_2 , NH_3 , óxidos de nitrógeno (NO y NO_2) y los compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles. La tabla 4 compara las emisiones de las principales fuentes globales de aerosoles secundarios.

La formación de nuevas partículas en la atmósfera ocurre a través del proceso llamado nucleación, durante el cual moléculas de gases poco volátiles

forman conglomerados que pueden crecer hasta formar partículas ultrafinas con diámetros de unos cuantos nanómetros. Para que este proceso ocurra, es necesario que la concentración de vapor del gas supere una concentración umbral, a partir de la cual el sistema puede rebasar la barrera de energía que existe para formar una fase condensada dentro de un gas. Un ejemplo de este proceso es la nucleación de partículas de ácido sulfúrico (H_2SO_4). El ácido sulfúrico se forma a partir de la oxidación en la atmósfera del dióxido de azufre (SO_2), el cual es emitido por volcanes y procesos industriales. Como el ácido sulfúrico es muy poco volátil, éste se condensa sobre partículas que ya existen en la atmósfera. Sin embargo, si no hay partículas o no son suficientes, entonces la concentración de ácido sulfúrico en la fase gas aumenta hasta que la concentración es suficientemente alta para formar partículas nuevas. Se cree que algunos compuestos orgánicos que se forman a partir de la oxidación de compuestos orgánicos volátiles (COVs) también pueden formar partículas nuevas. Este proceso sería importante cerca de bosques, en donde la emisión biogénica de COVs es considerable (Kanakidou *et al.*, 2005). En zonas urbanas, en donde la emisión de SO_2 y COVs por vehículos automotores e industrias es considerable, no se observa el proceso de nucleación con frecuencia porque la cantidad de partículas preexistentes es alta (Dunn *et al.*, 2004).

La remoción de partículas de la atmósfera ocurre principalmente por deposición, la cual puede ser seca o húmeda. La deposición seca consiste en la caída, convección y difusión de las partículas que termina con su adhesión a la superficie terrestre. La deposición húmeda ocurre en la presencia de agua y puede llevarse a cabo por lluvia o por lavado. La lluvia se forma cuando las partículas crecen por absorción de agua y llegan a tener un tamaño suficientemente grande como para caer por gravedad. Las gotas de lluvia, al caer, arrastran otras partículas que encuentran a su paso, proceso que se denomina deposición por lavado. Otro proceso de remoción de partículas es la coagulación, que consiste en la colisión y adhesión de dos partículas para formar una sola partícula. El proceso por el cual las partículas son removidas de la atmósfera depende de su tamaño. La deposición seca es un proceso muy lento y las partículas con diámetro menor que $1 \mu\text{m}$ que sólo están sujetas a este proceso pueden permanecer en la atmósfera durante varias semanas. Para partículas más grandes, el tiempo de permanencia es del

Tabla 3. Emisiones globales de partículas primarias durante el año 2000 (IPCC, 2001).

	Tipo de fuente	Emisión global Tg/año)
Polvo mineral	natural/antropogénica	2,150
Sal de mar	natural	3,340
Polvo industrial ($>1 \mu\text{m}$)	antropogénica	100
Aerosoles orgánicos (0 - 2 μm)		
Compuestos orgánicos		
Quema de biomasa	natural	54
Quema de combustibles fósiles	antropogénica	28
Biogénico ($>1 \mu\text{m}$)	natural	56
Carbón negro (0 - 2 μm)		
Quema de biomasa	natural	5.7
Quema de combustibles fósiles	antropogénica	6.6
Aeronaves	antropogénica	0.006

Tabla 4. Emisiones globales de partículas secundarias durante el año 2000 (IPCC, 2001).

	Emisión global (Tg de sustancia/año)
Sulfato ((NH₄)₂SO₄)	
Antropogénico	122
Biogénico	57
Volcánico	21
Nitrato (NO₃⁻)	
Antropogénico	14.2
Natural	3.9
Compuestos orgánicos	
COVs antropogénicos	0.6
COVs biogénicos	16

orden de días. Por esto, el mecanismo de remoción más eficiente para las partículas pequeñas (<0.1 μm) es la coagulación con partículas más grandes. La mayoría de las partículas menores que 20 nm desaparecen después de unas cuantas horas por coagulación entre ellas para formar partículas más grandes. Para partículas entre 0.5 y 2.5 μm, el proceso de remoción más eficiente es su activación para formar gotas de nubes y de lluvia por absorción de agua (Pöschl, 2005).

Procesos atmosféricos y aerosoles

Una vez que una partícula está en la atmósfera, ésta puede sufrir cambios en su tamaño y composición porque interactúa con la fase gaseosa de la atmósfera a través de procesos de evaporación y condensación de compuestos semivolátiles (como el agua y algunos compuestos orgánicos) y de reacciones que ocurren en su superficie o en el bulto. Todos estos procesos tienen un alto impacto en la regulación del tamaño y la composición de los aerosoles, así como de la concentración de los gases atmosféricos.

Un ejemplo de la importancia que tienen los aerosoles en la regulación de la composición de la atmósfera es el proceso por el cual se forma el “hoyo de ozono”. El “hoyo de ozono” es un fenómeno que se observa al inicio de la primavera en la estratosfera³ polar (septiembre en el Hemisferio Sur y marzo en

el Hemisferio Norte) durante el cual, la concentración de ozono disminuye considerablemente debido a la presencia de átomos de cloro formados por la fotólisis de clorofluorocarbonos⁴ (CFCs). La destrucción del ozono se lleva a cabo por ciclos catalíticos en los que un átomo de cloro puede destruir hasta 100,000 moléculas de ozono antes de ser convertido en alguna especie no reactiva como HOCl o ClNO₂. El hoyo de ozono ocurre solamente al principio de la primavera porque hay dos condiciones que se deben cumplir: la presencia de luz para que se formen los átomos de cloro, y temperaturas muy bajas (menores que -70°C) para que se puedan formar las nubes estratosféricas polares (NEPs). Estas nubes son aerosoles formados por partículas sólidas de agua, ácido sulfúrico y ácido nítrico. Sobre la superficie de las NEPs ocurren reacciones que convierten moléculas de cloro inactivas como el HOCl en cloro molecular (Cl₂), el cual puede fotolizarse y formar átomos de cloro. Además, las NEPs sirven como sumidero de ácido nítrico (HNO₃), el cual, de permanecer en la fase gas, podría fotolizarse para formar NO₂, que a su vez inhabilitaría un átomo de cloro formando ClNO₂, rompiendo así el ciclo de destrucción de ozono. Es decir, las NEPs participan en la destrucción del ozono estratosférico porque evitan la formación de moléculas inactivas de cloro, y permiten que los átomos de cloro participen en los ciclos de destrucción de ozono. Aunque la formación del hoyo de ozono es causada por la emisión antropogénica de CFCs, las reacciones de destrucción de ozono no serían tan eficientes sin la presencia de las partículas que forman las NEPs (Seinfeld y Pandis, 1998).

Aerosoles, radiación y clima

Además de interactuar con la fase gas en la atmósfera, los aerosoles interactúan con la radiación electromagnética, reflejándola, absorbiéndola o dispersándola. Algunos de los efectos más visibles de la presencia de aerosoles en la atmósfera son causados por la interacción de la luz con las partículas. Por

³ Estratosfera: es la capa de la atmósfera situada encima de la troposfera, y que se extiende hasta 50 km aproximadamente de la superficie terrestre.

⁴ Clorofluorocarbonos: son compuestos derivados de los hidrocarburos saturados obtenidos mediante la sustitución de átomos de hidrógeno por átomos de cloro y flúor. Debido a su alta estabilidad fueron muy usados como líquidos refrigerantes, agentes extintores y propelentes para aerosoles. La fabricación y empleo de clorofluorocarbonos son regulados por el protocolo de Montreal desde 1987 debido a sus efectos sobre la capa de ozono en la estratosfera (UNEP, 2002).

ejemplo, los arco iris se pueden observar por la refracción de la luz causada por gotas de agua en la atmósfera. Otro ejemplo es la falta de visibilidad que se observa cuando hay niebla, o cuando hay bruma en las ciudades contaminadas, la cual es causada por la dispersión⁵ de la luz al encontrar partículas en su camino. Sin embargo, el efecto más importante de los aerosoles al interactuar con la radiación solar es el efecto que tienen sobre la temperatura de la Tierra.

La temperatura de la Tierra está determinada por el balance entre la energía solar que llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética (la cual es la principal fuente de energía del planeta) y la energía reemitida por el planeta hacia el espacio en forma de calor. Parte de ese calor es atrapado en la atmósfera por ciertos gases (gases invernadero) resultando en lo que se conoce como el efecto invernadero. Este efecto natural es esencial para mantener la temperatura de la Tierra como la conocemos. Sin embargo, la emisión antropogénica de algunos gases invernadero como el CO₂, CH₄ y N₂O, están causando un aumento muy rápido de la temperatura de la Tierra durante las últimas décadas. A este fenómeno se le conoce como Calentamiento Global (IPCC, 2001). Al igual que los gases, los aerosoles juegan un papel muy importante dentro de la regulación de la temperatura terrestre; sin embargo su papel es más complicado debido a que los aerosoles, además de absorber la radiación, pueden también dispersarla o reflejarla.

La capacidad de algunos aerosoles (principalmente el carbón negro y polvo mineral con alto contenido de hierro) de absorber el calor emitido por la superficie de la Tierra, al igual que los gases invernadero, puede causar un calentamiento del planeta. Por otra parte, los aerosoles también pueden dispersar la luz proveniente del Sol y, en consecuencia, causar un enfriamiento debido a la reducción de energía solar incidente sobre la superficie de la Tierra.

A los efectos mencionados anteriormente, se le conoce como efectos directos de los aerosoles sobre el clima terrestre. Además, los aerosoles tienen efectos indirectos relacionados con la concentración y tamaño de las partículas que forman las nubes, lo cual altera su extensión y vida, así como la frecuencia de la lluvia. En general, las nubes se forman a partir

de la condensación de agua sobre aerosoles preexistentes y son importantes en la regulación del clima debido a su capacidad de reflejar la luz solar no permitiendo que penetre en la atmósfera terrestre. El aumento en la concentración de aerosoles puede causar que haya un mayor número de gotas de nubes, cada una de las cuales es de menor tamaño. Al ser las gotas más pequeñas, las nubes pueden reflejar mayor cantidad de luz hacia el espacio, además de que pueden permanecer más tiempo en la atmósfera, causando un enfriamiento de la Tierra.

Mientras que la absorción de energía por aerosoles tiene el mismo efecto que los gases invernadero, la dispersión y reflexión de la luz solar por los aerosoles y nubes tienen un efecto de enfriamiento de la superficie terrestre. La regulación del clima por los aerosoles es un proceso natural; sin embargo, es importante determinar el efecto de las emisiones antropogénicas sobre las concentraciones, composición y tamaño naturales de los aerosoles, y su efecto sobre el clima. La magnitud de dichos efectos depende del tamaño, concentración y composición de las partículas, las cuales son altamente variables dependiendo del sitio, la altitud y la historia de los aerosoles, por lo que existe una gran incertidumbre sobre el efecto neto de los aerosoles antropogénicos al calentamiento global. A pesar de esto, existe cada vez mayor consenso entre los científicos de que las emisiones antropogénicas de aerosoles y de sus precursores pueden tener un efecto importante sobre el clima. Los modelos predicen que el efecto de los aerosoles más importante sobre el clima global es el enfriamiento, el cual podría contrarrestar el efecto de calentamiento causado por los gases invernadero emitidos por las actividades humanas. Sin embargo existen muchas incertidumbres al respecto, relacionadas principalmente con la dificultad de modelar las propiedades de los aerosoles atmosféricos a nivel global (IPCC, 2001).

Con base en el efecto de enfriamiento que los aerosoles parecen tener sobre la temperatura de la Tierra, algunos científicos, entre ellos Paul Crutzen, Premio Nobel de Química 1995, han propuesto la inyección de gases precursores de aerosoles de sulfato directamente en la atmósfera para contrarrestar el calentamiento global causado por la emisión antropogénica de gases invernadero (Crutzen, 2006). Esta medida podría tener efectos dañinos sobre el medio ambiente causados por la deposición de los aerosoles de sulfato en forma de lluvia ácida, por lo que Crutzen (2006) considera que la mejor solución

⁵ Dispersión de luz: proceso por el cual la luz se desvía de su trayectoria en línea recta al atravesar un medio heterogéneo.

al calentamiento global es la aplicación de medidas a nivel global para reducir la emisiones de CO₂. Sin embargo, hasta el momento las naciones han sido incapaces de llegar a acuerdos internacionales que disminuyan dichas emisiones a nivel global, por lo que en un futuro podría ser necesario considerar medidas drásticas, como la mencionada anteriormente, para evitar daños aún mayores.

Partículas y salud humana

A través de la historia, han ocurrido varios episodios de contaminación de aire que han acusado la muerte de personas en unos cuantos días. Por ejemplo, en 28 octubre de 1948, el pueblo de Donora (60 km al sur de Pittsburgh, en donde se encontraba dos compañías metalúrgicas importantes) fue testigo de una inversión térmica que causó altos niveles de dióxido de azufre, sulfatos y fluoruros en el aire durante tres días seguidos. En octubre 29, la visibilidad no era mayor que unas decenas de metros y cuando la lluvia limpió el aire el 30 de octubre, 20 personas ya habían fallecido y miles de otras personas se encontraban enfermas. Otro ejemplo muy conocido es la "Niebla Asesina de Londres": el 5 de diciembre de 1952, un mezcla de niebla y humo negro descendieron sobre Londres, causando una visibilidad de menos de medio metro durante cuatro días seguidos. Durante este tiempo se registraron 4000 muertes, casi tres veces más de las que normalmente se registraban durante la misma época del año (Seinfeld, 2004). Afortunadamente, eventos tan letales como éstos no son comunes; sin embargo, se sabe que, aun a concentraciones bajas, la contaminación del aire puede tener efectos negativos sobre la salud humana. Los efectos negativos de la contaminación del aire a la salud son causados por la presencia de algunos gases tales como O₃, SO₂ y CO, así como de las partículas. Las poblaciones de zonas urbanas e industriales se encuentran particularmente en riesgo debido a las concentraciones relativamente altas de dichos contaminantes en la atmósfera causadas por las emisiones vehiculares e industriales (Molina y Molina, 2004).

Los efectos sobre la salud humana por la exposición a altas concentraciones de material particulado (PM) se dan principalmente a largo plazo e incluyen daños a la salud cardiopulmonar, aumento de la mortalidad y reducción de la expectativa de vida. De hecho, la evidencia indica que la exposición a altas concentraciones de partículas por periodos cortos de tiempo no tiene un efecto grave sobre la salud. Por otro lado, los estudios que ligan la expo-

sición a altas concentraciones de partículas con efectos sobre la salud a largo plazo han sido muy criticados debido a dificultad que implica el seguimiento de miles de personas por periodos largos de tiempo y el control de factores de riesgos individuales como hábitos (por ejemplo fumar) o herencia. Sin embargo, dichas críticas probablemente han sido motivadas por las implicaciones políticas y normativas del resultado. A pesar de todo, cada vez existe un mayor consenso entre la comunidad científica de que la relación PM – mortalidad y salud cardiopulmonar es real (Pope_III y Dockery, 2006).

Los efectos del PM a nivel pulmonar incluyen inflamación de las vías respiratorias menores, la cual puede producir asma y bronquitis crónica, obstrucción de las vías respiratorias y reducción en la capacidad pulmonar. La inflamación de las vías respiratorias puede ser causada por la presencia de compuestos tóxicos como compuestos aromáticos policíclicos y metales pesados que tienen la capacidad de dañar proteínas celulares, lípidos, membranas y ADN. Algunos individuos pueden desarrollar respuestas alérgicas, asma e inflamación más fácilmente debido a la mutación de genes o a existencia de otros factores como edad, enfermedades cardíacas y pulmonares crónicas o diabetes mellitus. La respuesta antiinflamatoria del cuerpo, puede ser tan fuerte que llegue a afectar otros órganos como el corazón. El PM también puede interferir con los mecanismos de limpieza y desactivación de bacterias en el tejido pulmonar. Incluso, existen estudios que sugieren la posibilidad de que las partículas entren directamente al torrente sanguíneo a través de las membranas alveolares (Nel, 2005).

La exposición a PM es un factor de riesgo asociado con ataques cardíacos, infartos, arritmias cardíacas y muerte súbita. El PM afecta al corazón modificando el ritmo cardíaco; sin embargo, el mecanismo de cómo sucede esto aún no se conoce con precisión. Una hipótesis consiste en que las partículas causan inflamación en los alvéolos a la cual el cuerpo responde con la liberación de proteínas llamadas citocinas en las vías circulatorias. Las citocinas promueven respuestas inmunes en otras áreas del cuerpo causando, entre otros, coagulación de la sangre y constricción de vasos sanguíneos. El resultado final puede ser el depósito de lípidos que bloquean el flujo de sangre hacia el corazón. Estas reacciones implican un menor riesgo a un ataque cardíaco que, por ejemplo, altos niveles de colesterol en la sangre; sin embargo, la relación entre PM –

salud cardiaca es preocupante debido al alto número de personas expuestas a este riesgo (Kaiser, 2005).

Aunque se acepta que existe una relación entre exposición a partículas y salud humana, todavía no está claro qué propiedades de las partículas son las que determinan su toxicidad. El tamaño es importante porque son las partículas más pequeñas (1 μm) las que pueden llegar a lo más profundo de los pulmones y las partículas más grandes generalmente quedan atrapadas en la parte alta y media del sistema respiratorio. Otra propiedad relevante de las partículas es su composición química puesto que éstas pueden contener compuestos tóxicos como metales pesados (Pb y Hg) y PAHs (sobre todo aquéllas generadas por combustión). Otras propiedades del PM que pueden ser determinantes en los efectos a la salud son su estructura, concentración, área superficial y solubilidad (McMurry *et al.*, 2004).

Conclusiones

La presencia de partículas en la atmósfera tiene importantes implicaciones al medio ambiente, el clima del planeta y la salud humana. Por ello, caracterizar la composición de los aerosoles atmosféricos, estudiar su propiedades físicas y químicas, caracterizar y cuantificar sus fuentes de emisión, y comprender los procesos en los cuales participan son tareas importantes pero difíciles de realizar debido a la diversidad de fuentes y a la variabilidad temporal y espacial en las propiedades de las partículas a nivel local, regional y global. Es por esto que el estudio de los aerosoles atmosféricos es, en la actualidad, una de las áreas más activas en la química atmosférica. ▀

Referencias

- Boudries, H., M.R., Canagaratna, J.T. Jayne, M.R. Alfarra, J. Allan, K.N. Bower, H. Coe, S.C. Pryor, J.L. Jimenez, J.R. Brook, S. Li y D.R. Worsnop, Chemical and physical processes controlling the distribution of aerosols in the Lower Fraser Valley, Canada, during the Pacific 2001 field campaign, *Atmospheric Environment*, **38**, 5759-5779, 2004.
- Canagaratna, M.R., J.T. Jayne, J.L. Jimenez, J.D. Allan, M.R. Alfarra, Q. Zhang, T.B. Onasch, F. Drewnick, H. Coe, A. Middlebrook, A. Delia, L.R. Williams, A.M. Trimborn, M. J. Northway, C.E. Kolb, P. Davidovits y D.R. Worsnop, Chemical and Microphysical Characterization of Ambient Aerosols with the Aerodyne Aerosol Mass Spectrometer, *Mass Spectrometry Reviews*, **26**, 158-222, 2007.
- Crutzen, P.J., Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma?, *Climate Change*, **77**, 211-219, 2006.
- Drewnick, F., S. S. Hings, J. Curtius, G. Eerdekens y J. Williams, Measurement of fine particulate and gas-phase species during the New Year's fireworks 2005 in Mainz, Germany, *Atmospheric Environment*, **40**, 4316-4327, 2006.
- Dunn, M. J., J.L. Jimenez, D. Baumgardner, T. Castro, P.H. McMurry y J.N. Smith, Measurements of Mexico City nanoparticle size distributions: Observations of new particle formation and growth, *Geophysical Research Letters*, **31**, L10102, 2004, doi:10.1029/2004GL019483.
- IPCC, IPCC Third Assessment Report - Climate Change 2001, Intergovernmental Panel of Climate Change, Cambridge, U.K., 2001
- Jacobson, M. C., H.C. Hansson, K. J. Noone y R. J. Charlson, Organic atmospheric aerosols: review and state of the science, *Reviews of Geophysics*, **38**, 267-294, 2000.
- Kaiser, J., Mounting Evidence Indicts Fine-Particle Pollution, *Science*, **307**, 1858-1861, 2005.
- Kanakidou, M., J.H. Seinfeld, S.N. Pandis, I. Barnes, F. J. Dentener, M.C. Facchini, R.V. Dingenen, B. Ervens, A. Nenes, C.J. Nielsen, E. Swietlicki, J.P. Putaud, Y. Balkanski, S. Fuzzi, J. Horth, G.K. Moortgat, R. Winterhalter, C.E. L. Myhre, K. Tsigaridis, E. Vignati, E.G. Stephanou y J. Wilson, Organic aerosol and global climate modelling: a review, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **5**, 1053-1123, 2005.
- McMurry, P., M. Sheperd y J. Vickery, *Particulate Matter Science for Policy Makers; A NARSTO Assessment*, Cambridge University Press, USA, 2004.
- Molina, M.J. y L.T. Molina, Megacities and Atmospheric Pollution, *Journal of the Air and Waste Management Association*, **54**, 644-680, 2004.
- Nel, A., Air pollution-related illness: effects of particles, *Science*, **308**, 804-806, 2005.
- Pope_III, C. A. y D. W. Dockery, Health effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that connect, *Journal of the Air and Waste Management Association*, **56**, 709-742, 2006.
- Pöschl, U., Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects, *Angewandte Chemie*, **44**, 7520-7540, 2005, doi: 10.1002/anie.200501122.
- Salcedo, D., T. B. Onasch, K. Dzepina, M. R. Canagaratna, Q. Zhang, J.A. Huffman, P. F. DeCarlo, J.T. Jayne, P. Mortimer, D. R. Worsnop, C. E. Kolb, K.S. Johnson, B. Zuberi, L.C. Marr, R. Volkamer, L.T. Molina, M. J. Molina, B. Cardenas, R.M. Bernabé, C. Márquez, J.S. Gaffney, N. A. Marley, A. Laskin, V. Shutthanandan, Y. Xie, W. Brune, R. Lasher, T. Shirley y J.L. Jimenez, Characterization of ambient aerosols in Mexico City during the MCMA-2003 campaign with Aerosol Mass Spectrometry: results from the CENIC Supersite, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **6**, 925-946, 2006.
- Schneider, J., S. Borrmann, A.G. Wollny, M. Bläsner, N. Mihalopoulos, K. Oikonomou, J. Sciare, A. Teller, Z. Levin y D.R. Worsnop, Online mass spectrometric aerosol measurements during the MINOS campaign (Crete, August 2001), *Atmospheric Chemistry and Physics*, **4**, 65-80, 2004.
- Seinfeld, J. H., Air Pollution: A Half Century of Progress, *American Institute of Chemical Engineers Journal*, **50**, 1096-1108, 2004.
- Seinfeld, J. H. y S. N. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics. From air pollution to climate change*, John Wiley and Sons, USA, 1998.
- Tegen, I. y I. Fung, Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification, *Journal of Geophysical Research*, **100**, 18, 707-18, 726, 1995.
- UNEP, Scientific assessment of ozone depletion: 2002, United Nations Environmental Program, 2002.