

Qué son, cómo son y cómo se originan las partículas

Existe un gran número de contaminantes en la atmósfera que tienen distintas repercusiones en el medioambiente y la salud humana. Entre estos contaminantes destacan las partículas, también conocidas como partículas suspendidas, aeropartículas, material particulado —del inglés *particulate matter*— y aerosoles, que son algunos de los términos utilizados para nombrar una mezcla de compuestos microscópicos o muy pequeños en forma de líquidos y sólidos suspendidos en el aire (por ejemplo hollín, polvo, humo y neblinas).

1.1 Clasificación de las partículas

Las partículas se pueden clasificar de muchas maneras de acuerdo con diferentes criterios; los más comunes se describen a continuación.

Partículas según su origen

Esta es una de las clasificaciones más básicas de las partículas ambientales y de los demás contaminantes del aire; distingue entre partículas primarias y partículas secundarias (ver figura 1.1) conforme al siguiente criterio.

Partículas primarias: son aquellas que se emiten directamente a la atmósfera por diversas fuentes (por ejemplo, el humo oscuro que se observa en los escapes de coches y camiones, el polvo de las calles).

Partículas secundarias: son aquellas que se forman en la atmósfera como resultado de reacciones químicas a partir de la presencia de materiales gaseosos, llamados precursores. Los principales gases precursores de las partículas son el dióxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el amoníaco (NH_3), los cuales forman partículas de sulfatos y nitratos principalmente, así como partículas suspendidas secundarias orgánicas derivadas de la oxidación fotoquímica de los compuestos orgánicos [1,2].

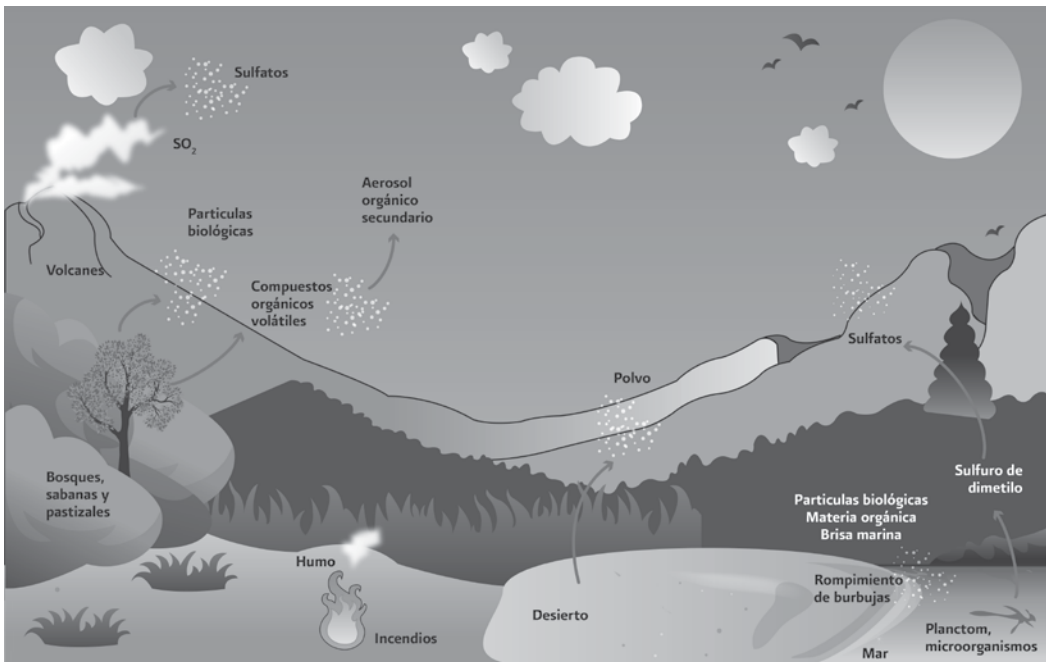
Partículas según su tamaño

Las partículas suspendidas también se clasifican por su tamaño (ver figura 1.2), pero como tienen una infinidad de formas no es posible caracterizarlas con una sola dimensión geométrica real. Por ello, se utiliza el diámetro aerodinámico como un indicador del tamaño de la partícula; este indicador es igual al diámetro de una partícula esférica de densidad unitaria que tiene la misma velocidad terminal¹ que la partícula considerada, independiente de su forma, tamaño o densidad bajo condiciones de temperatura, presión y humedad existentes [4]. El uso de este concepto permite también determinar el transporte, los procesos de remoción en el aire y en superficies, así como la trayectoria de las partículas dentro del sistema respiratorio.

Figura 1.1
Ejemplo de proceso químico de formación de partículas secundarias

El tamaño de las partículas suspendidas es una característica muy importante, porque mientras más pequeño sea su diámetro aerodinámico mayor será su capacidad de penetrar a áreas más profundas del sistema respiratorio; por lo tanto, en función de esta característica, la clasificación de las partículas se ha

1 La velocidad constante que alcanza la partícula debido a la fuerza de arrastre ejercida por el fluido a través del cual se está moviendo.



Fuente [3]

ido modificando a lo largo del tiempo, debido principalmente a los resultados de numerosas investigaciones sobre los efectos de las partículas ambientales en la salud humana.

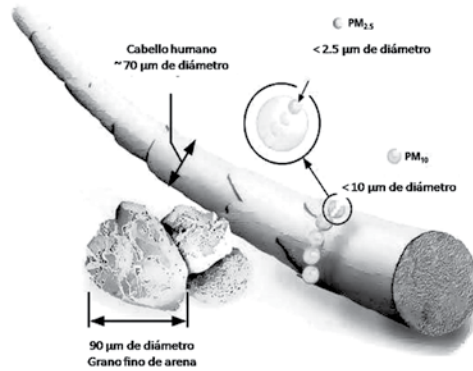
Originalmente, el indicador de la calidad del aire referente a las partículas era solo para las partículas suspendidas totales (PST), las cuales comprenden un rango de tamaño entre 0.005 y 100 micrómetros o micras (μm) de diámetro aerodinámico [6,7]; sin embargo, la mayoría de las partículas presentes en la atmósfera tienen un tamaño menor a 40 μm [1]. Posteriormente, algunas investigaciones sobre los efectos de las partículas ambientales en la salud se enfocaron en partículas que pueden ser inhaladas por el sistema respiratorio, y se encontró que las partículas de diámetro aerodinámico menor a 10 μm (PM_{10}) tienen esta característica; a estas partículas se les conoce también como fracción respirable o inhalable. Sin embargo, actualmente la atención se ha centrado menos en las partículas gruesas y más en las partículas finas y ultrafinas, comprendidas dentro de las PM_{10} . La fracción gruesa la componen las partículas cuyo diámetro aerodinámico se encuentra entre 2.5 y 10 μm ($\text{PM}_{2.5-10}$), la fracción fina comprende las partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$), y las ultrafinas se refieren a las partículas menores a 1 μm (PM_1).

Tanto las partículas finas como las partículas gruesas pueden ser primarias, es decir, emitidas directamente por la fuente; sin embargo, de manera general se considera que las partículas finas son mayoritariamente secundarias, o sea, formadas en la atmósfera a través de un proceso químico.

Partículas según su proceso de formación y tamaño

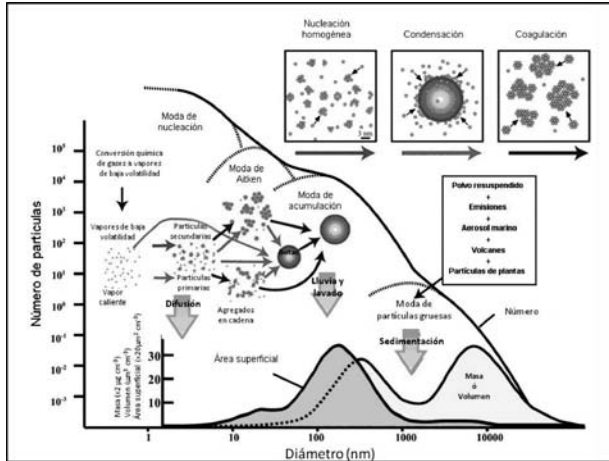
El diámetro aerodinámico está en función de los procesos de formación de las partículas; frecuentemente se utiliza una clasificación que constituye una combinación de los procesos de formación y del tamaño de las partículas, y las distingue en diversas "modas" (ver figura 1.3) que se conocen como moda de nucleación, Aitken, de acumulación y gruesa [2, 8, 9].

Figura 1.2 Diferencia en los tamaños de las partículas



Fuente [5]

Figura 1.3 Clasificación de partículas por su proceso de formación y tamaño



Fuente [10]

Moda de nucleación ($>0.02 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m} = 1000 \text{ nm}$): consiste principalmente de partículas que provienen de la condensación de vapores, y su formación depende de las condiciones de presión, temperatura y humedad relativa, así como de la propia concentración del vapor (nucleación homogénea), aunque en el proceso de nucleación también pueden intervenir otras partículas finas que estén presentes, las cuales se adhieren a las gotas de vapor formadas por la concentración de este (nucleación heterogénea). El mayor número de partículas se encuentra entre 5 y 15 nm. Los únicos gases precursores con

capacidad para formar partículas por nucleación homogénea en aire ambiente son el H_2SO_4 y el NH_3 . Las partículas nucleadas tienen una vida media de solo algunas horas, ya que rápidamente se coagulan o aumentan de tamaño porque otras sustancias se condensan sobre ellas.

Moda Aitken ($0.02\text{-}0.1 \mu\text{m}$): estas partículas pueden ser primarias, o sea, emitidas a la atmósfera por procesos naturales o antrópicos², o bien secundarias, es decir, originadas como consecuencia del crecimiento de partículas nucleadas (por ejemplo, por coagulación), por condensación³, o por reacciones en fase líquida (por compuestos inorgánicos). La permanencia de este tipo de partículas en la atmósfera es más prolongada que la de las partículas en la moda de nucleación, mientras que su concentración se ve afectada en gran medida por la presencia de actividades humanas, y es alrededor de cien veces más elevada a nivel de la calle en las ciudades que en zonas remotas.

Moda de acumulación ($0.1\text{-}1 \mu\text{m}$): son originadas como consecuencia del crecimiento de partículas de la moda Aitken, principalmente por reacciones en fase lí-

² Relacionados con la actividad del ser humano.

³ La coagulación y la condensación de partículas tiene relación con el aumento de tamaño de las partículas por agregación de estas o por la condensación de gases sobre estas.

Cuadro 1.1 Principales características de las partículas ultrafinas, finas y gruesas

	Tipo de partículas		
	Ultrafinas ($PM_{0.1}$)	Finas ($\leq PM_{2.5}$)	Gruesas ($PM_{2.5}$ - PM_{10})
Proceso de formación	<ul style="list-style-type: none"> Nucleación de gases atmosféricos, incluidos H_2SO_4, NH_3 y algunos compuestos orgánicos Condensación de gases 	<ul style="list-style-type: none"> Condensación de gases Coagulación de partículas pequeñas Reacción de gases en o sobre las partículas Evaporación de neblina y gotas de agua en las que los gases se han disuelto y reaccionado 	<ul style="list-style-type: none"> Procesos mecánicos (prensado, molienda, abrasión, rompimiento de sólidos/gotas) Evaporación de aerosoles Suspensión de polvos Reacción de gases en o sobre partículas

Fuente [9]

quida que ocurren en las gotas de agua en las nubes. Su tiempo de residencia en la atmósfera es grande, ya que los mecanismos de remoción son menos eficientes en este intervalo de tamaños; por tanto, se pueden utilizar como indicadores o trazadores del transporte de largo alcance de las partículas. Por otro lado, las partículas de este intervalo de tamaño tienen efectos ópticos dominantes, ya que son muy eficientes para dispersar la luz y, por ello, afectan la visibilidad.

Moda gruesa ($>1 \mu m$): se forman en su mayoría por procesos mecánicos, como la erosión de la superficie terrestre (materia mineral u otros materiales), o el reventar de burbujas en la superficie de mares y océanos (aerosoles marinos). La moda gruesa se caracteriza por presentar un reducido número de partículas, pero una elevada masa.

En el cuadro 1.1 se resumen los principales procesos de formación de las partículas ultrafinas, finas y gruesas, que en algunos casos tienen relación con el origen de sus emisiones a la atmósfera.

Partículas filtrables y condensables

Las partículas están compuestas de una porción filtrable y una condensable, y su diferencia consiste en su tamaño, su estado físico en la atmósfera y el método empleado para su recolección.

Partículas filtrables: son las partículas que se colectan en o antes del filtro de un tren de muestreo del método 5 de la EPA o equivalente.

Partículas condensables: incluyen material en estado gaseoso que es colectado en trampas o tubos impactores del tren de muestreo (método 5 de la EPA).

Esta clasificación es importante debido a que algunos factores para la estimación de emisiones de partículas (ver capítulo 4) se refieren a partículas filtrables o condensables; sin embargo, los factores de emisión de partículas totales son la suma de los factores de emisión para las partículas filtrables y para las condensables.

1.2 Características de las partículas

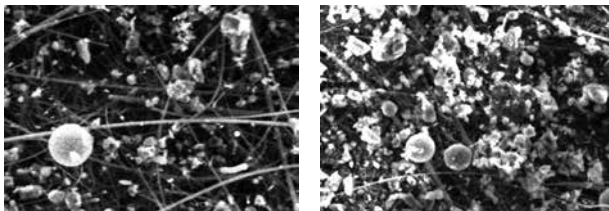
Las partículas suspendidas tienen características únicas entre los contaminantes atmosféricos. Mientras que los contaminantes en fase gaseosa, como el dióxido de azufre, el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno, son compuestos químicos bien definidos, las partículas varían en cuanto a su forma, tamaño, composición química y permanencia en la atmósfera. Estas tres características, así como la relación entre la masa y el volumen de las partículas, se abordan a continuación.

Formas de las partículas

Las partículas ambientales presentan una variedad de formas, como esferas, elipses, cubos, formas irregulares o geometría fractal, etc. (ver figura 1.4). La forma de las partículas es muy importante para determinar sus propiedades ópticas, las que juegan un papel muy significativo en el balance radiativo del planeta [13] (ver capítulo 2) debido a que la Tierra tiene una atmósfera compuesta por moléculas y partículas

suspendidas que interactúan con la luz solar y se encargan de su dispersión. Por otra parte, la diversidad de formas de las partículas también tiene un efecto en su diámetro aerodinámico de ellas.

Figura 1.4 Ejemplos de formas de partículas ambientales, colectadas en un filtro



Fuente cortesía de Luisa Manzanares P.

Composición química de las partículas

La composición química de las partículas es muy diversa y depende, prin-

principalmente, tanto de la fuente emisora como del mecanismo de formación de las partículas [2]. Por ejemplo, las partículas encontradas en una región costera estarán principalmente compuestas de cloruro de sodio proveniente de la sal presente en el mar, mientras que las partículas de origen geológico estarán formadas por óxidos de hierro, calcio, sílice y aluminio.

En los procesos de combustión se emiten partículas de carbón, pero también materia inorgánica que proviene del contenido de mineral presente en los combustibles. Lo mismo pasa con la mayoría de los procesos industriales, como las cementeras, donde las emisiones serán compuestos inorgánicos, a menudo de composición similar a las materias primas o productos generados.

Las partículas ambientales que provienen de las fuentes móviles que usan gasolina son una mezcla de carbón orgánico, carbón elemental y pequeñas trazas de metales y sulfatos. De esas partículas, el carbón orgánico contribuye con entre el 26 % y el 88 % del total de partículas ambientales provenientes de esta fuente. Aunque los compuestos del carbón orgánico no están todavía bien caracterizados, se han identificado compuestos orgánicos con alto peso molecular e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Anteriormente, las emisiones de partículas provenientes de los vehículos consistían principalmente en compuestos de plomo por el aditivo que se le agregaba al combustible; sin embargo, con la eliminación de ese aditivo se eliminó también el compuesto de las emisiones.

En vehículos que utilizan diésel como combustible, las partículas ambientales emitidas están compuestas principalmente de carbón elemental, hidrocarburos pesados y sulfatos. El primero contribuye con alrededor del 70 al 80 % de la masa; los segundos, originados por el combustible y el aceite lubricante, son responsables de entre el 13 y el 23 % de la composición; los sulfatos (en la moda de nucleación) contribuyen con alrededor del 7 %. No obstante, las proporciones de estos compuestos va-

Cuadro 1.2 Componentes mayoritarios y minoritarios de las partículas suspendidas

Compuestos mayoritarios	Compuestos minoritarios
<ul style="list-style-type: none">• Sulfatos (SO_4)• Nitratos (NO_3)• Amonio (NH_4)• Sodio y cloro (Na y Cl)• Carbón elemental• Carbón orgánico o Aerosol orgánico secundario (SOA, secondary organic aerosol)• Componentes minerales o Fe_2O_3, Ca, Si y Al• Agua	<ul style="list-style-type: none">• Elementos traza: por ejemplo, metales, como plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), níquel (Ni), cromo (Cr), zinc (Zn) y magnesio (Mg), etc.• Compuestos orgánicos: por ejemplo, hidrocarburos aromáticos, HAP, alifáticos, aldehídos, ácidos carboxílicos y cetonas, entre otros.

rían de acuerdo con parámetros como la temperatura, los sistemas de inyección del combustible, el catalizador, entre otros [9].

Es así que dependiendo del tipo de partículas y de su fuente de emisión se pueden encontrar tanto compuestos mayoritarios como minoritarios (ver cuadro 1.2). En la siguiente sección se aborda este tema con más detalle.

Compuestos mayoritarios

Estos compuestos generalmente conforman la mayor parte de la masa de las partículas, y sobresalen los siguientes:

- Sulfatos. Son principalmente componentes secundarios que se originan de la oxidación del SO_2 , aunque pueden estar presentes como un componente primario derivado de la sal de los mares o de la materia mineral, como el yeso.
- Nitratos. La forma más común de los nitratos en las partículas suspendidas es como NH_4NO_3 , compuesto que se deriva de la neutralización de vapores de HNO_3 por NH_3 . También los nitratos pueden estar presentes como nitrato de sodio.
- Amonio. Los compuestos más comunes de amonio presentes en las partículas son el sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$) y el nitrato de amonio (NH_4NO_3).
- Sodio y cloro. Principalmente se originan de la sal marina.
- Carbón elemental. Está constituido principalmente por carbón negro (hollín) formado durante la combustión de combustibles fósiles y biomasa.
- Carbón orgánico. Comprende los compuestos orgánicos, tanto primarios, derivados de fuentes móviles o industriales, como secundarios, resultado de la oxidación de compuestos orgánicos volátiles.
- Componentes minerales. Se originan del material de suelo y roca por procesos de la fuerza del viento, de construcción y demolición. Los suelos y las rocas son ricos en aluminio, sílice, hierro y calcio.
- Agua. Hay componentes en las partículas ambientales, especialmente las sales como $(NH_4)_2SO_4$, NH_4NO_3 y $NaCl$, que pueden tomar agua de la atmósfera y convertirse en gotas líquidas. Esta agua puede representar un componente significativo de la masa de las partículas.

Compuestos minoritarios

Estos compuestos pueden estar presentes adicionalmente a los compuestos mayoritarios en las partículas ambientales o formar parte de ellos. Los principales compuestos minoritarios son:

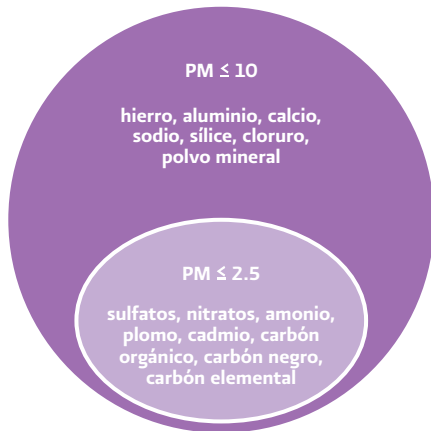
- Elementos traza. Ejemplos de estos son los metales, como plomo, cadmio, mercurio, níquel, cromo, zinc y manganeso, los cuales pueden ser emitidos por procesos metalúrgicos, sistemas de combustión, etc. Las concentraciones de los elementos traza son muy pequeñas, tanto que su detección es a menudo una función de la sensibilidad del procedimiento analítico utilizado.
- Compuestos orgánicos traza. A pesar de que la masa total de los compuestos orgánicos puede conformar una parte significativa de la masa total de las partículas, hay una importante cantidad de compuestos orgánicos individuales que están presentes en muy bajas concentraciones; ejemplos de ellos son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y alifáticos, los aldehídos, los ácidos carboxílicos y las cetonas, entre otros.

En general, en los inventarios de emisiones no se determina la composición de las partículas, por lo que este tipo de estudios se lleva a cabo de manera independiente y con apoyo de equipos y personal especializados. Por ello, el Instituto Nacional de Ecología [14] realizó un estudio sobre la variabilidad espacial de la composición y la toxicidad de las partículas en la ciudad de México. Los resultados muestran que la distribución de los elementos que componen las partículas varía por zona y tamaño; así, el calcio es el elemento mayoritario en las PM_{10} , mientras que el sodio, el azufre y el calcio son los elementos mayoritarios en las $PM_{2.5}$, y en esta misma fracción el sulfato resultó ser el ion con mayor presencia entre todos los analizados [14].

Otros estudios que se han realizado en la ciudad de México, como la campaña Milagro [15, 16], analizaron la composición de las partículas, y encontraron que la mayor contribución la aportan los compuestos orgánicos, seguidos de los nitratos, los sulfatos y el amonio; el porcentaje de estos últimos varía de acuerdo con el sitio donde se colectaron las muestras. Las fuentes identificadas de los compuestos orgánicos fueron quema de biomasa/madera, fuentes primarias urbanas y fuentes secundarias.

Otro estudio importante en México es el realizado en la ciudad de Mexicali [17], donde se encontró una masa de PM_{10} muy superior a la de $PM_{2.5}$. El valor más alto determinado para las PM_{10} fue de 796 mg, mientras que para las $PM_{2.5}$ fue de 44.2 mg. Se encontraron 16 elementos en ambos tamaños de partículas, y los relativos al suelo fueron Al, Si, K, Ca y Fe, mientras que los elementos de origen antrópico más importantes fueron Cu y Zn.

Figura 1.5 Composición típica de las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$



Fuente: [17, 18, 19, 20, 21, 22]

La figura 1.5 muestra composiciones típicas de las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ que se han identificado en numerosas caracterizaciones de partículas llevadas a cabo en varias partes del mundo [17, 18, 19, 20, 21, 22]. En algunas de estas referencias se encontró que en el sureste de España y Europa los sulfatos y nitratos son los compuestos mayoritarios en las partículas $PM_{2.5}$, aunque en estudios realizados en Beijing, China, el carbón orgánico y el carbón elemental, en conjunto, son los que mayormente contribuyen al total de la masa de $PM_{2.5}$, seguidos por los sulfatos. En

otro estudio realizado en Barcelona, el polvo mineral contribuyó con el 37 % en la composición de las $PM_{2.5}$, mientras que los aerosoles secundarios inorgánicos contribuyeron con el 27 %.

Estos trabajos confirman que la predominancia de una u otra especie química en la composición de las partículas dependerá mayoritariamente del tipo de fuente, como se menciona en la siguiente sección.

A manera de resumen, el cuadro 1.3 presenta los principales componentes de las partículas ultrafinas, finas y gruesas.

Permanencia de las partículas en la atmósfera

Las partículas son removidas de la atmósfera a través de diferentes procesos, como la sedimentación y la precipitación, pero es también el tamaño de las partículas uno de los factores que determinan el tiempo de residencia⁴ de las partículas. Las partículas $>20 \mu m$ pueden permanecer suspendidas en la atmósfera durante algunas horas, mientras que las partículas entre 2 y 3 μm pueden permanecer de 2 a 4 días. Las partículas en un rango de tamaño 0.1-1 μm , es decir partículas en la moda de acumulación y partículas Aitken, son las que muestran el mayor tiempo de resi-

⁴ Es el tiempo requerido para que un determinado material complete su ciclo de ingreso, permanencia y egreso en un medio.

Cuadro 1.3 Principales características de la composición de las partículas ultrafinas, finas y gruesas

	Tipo de Partículas		
	Ultrafinas ($PM_{0.1}$)	Finas ($\leq PM_{2.5}$)	Gruesas ($PM_{2.5}$ - PM_{10})
Composición	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfato • Carbón elemental • Compuestos metálicos • Compuestos orgánicos con baja saturación de presión de vapor a temperatura ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfato, nitrato, amonio, iones de hidrógeno • Carbón elemental • Gran variedad de compuestos orgánicos • Metales: compuestos de Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe, etc. • Agua ligada a las partículas • Bacterias, virus 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitratos, cloruros, sulfatos de reacciones de HNO_3, HCl y SO_2 con partículas gruesas • Óxidos de elementos de la corteza terrestre (Si, Al, Ti, Fe) • $CaCO_3$, $CaSO_4$, NaCl, sal marina • Bacterias, polen, moho, esporas de hongos, detritos de plantas y animales

Fuente [9]

dencia, que varía desde días hasta varias semanas, y son removidas principalmente por precipitación pluvial. Además, las partículas en este rango de tamaño forman fácilmente gotas de lluvia en las nubes, por lo que su tiempo de residencia es muy similar al del agua, que es de 10 días. Las partículas carbonáceas y orgánicas son difíciles de mojar, por lo que antes de ser removidas por precipitación deben pasar por un periodo de oxidación superficial, lo que resulta en tiempos de residencia mayores cuando se comparan con las partículas inorgánicas, como los sulfatos. Cabe mencionar que el SO_2 tiene una constante de Henry⁵ muy alta; por esta razón, la formación de aerosol secundario resulta relativamente rápida para este compuesto.

Otros factores que afectan el tiempo de residencia de las partículas ambientales son sus propiedades termodinámicas, que se refieren a la distribución de la masa entre la fase gaseosa y de aerosol, lo cual depende de la temperatura y la humedad. Así, se espera que si hay cambios en la temperatura y la humedad en la atmósfera, también haya cambios en las concentraciones de partículas como sulfato de amonio y algunos aerosoles orgánicos. Por ejemplo, las concentraciones de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ asociadas con sulfatos de amonio son bajas en verano y altas en invierno [2].

El cuadro 1.4 presenta las principales características de solubilidad, vida media atmosférica, proceso de remoción y distancia de transporte de las partículas ultrafinas, $PM_{2.5}$ y $PM_{2.5-10}$, incluidas las fuentes de emisión naturales y antrópicas asociadas con cada especie o componente.

⁵ La capacidad de un gas para disolverse en agua a una presión y temperatura dadas.

Cuadro 1.4 Principales características de las partículas ambientales que influyen en su permanencia en la atmósfera

Características	Tipo de partículas		
	Ultrafinas (PM _{0.1})	Finas (\leq PM _{2.5})	Gruesas (PM _{2.5} -PM ₁₀)
Solubilidad	No están bien caracterizadas	Muy solubles, higroscópicas y delicuescentes	Muy insolubles y no higroscópicas
Vida media atmosférica	Minutos a horas	Días a semanas	Minutos a horas
Proceso de remoción	<ul style="list-style-type: none"> • Crecen en la moda de acumulación • Se difunden en gotas de lluvia y otras superficies 	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de nubes y lluvia • Precipitación seca 	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación seca • Eliminación por gotas de lluvia
Distancia de transporte	De menos de uno a decenas de kilómetros	De cientos a miles de kilómetros	De menos de un kilómetro a decenas de kilómetros (de cientos a miles de kilómetros en tormentas de arena para la fracción de tamaños pequeños)

Fuente [9]

Cuadro 1.5 Influencia del tamaño de partícula en el número de partículas y el área superficial para una masa de partícula dada, asumiendo una forma esférica

Diámetro de partícula (μm)	Número relativo de partículas	Área superficial de partículas
10	1	10
1	10 ³	1 ²
0.1	10 ⁶	1 ⁴
0.01	10 ⁹	1 ⁶

Número de partículas ambientales

Si se considera que no hay grandes cambios en la densidad de la partícula según su tamaño, la masa de la partícula se puede considerar muy similar al volumen. Así, por ejemplo, si vemos el efecto de dividir una partícula individual de 10 μm en partículas de 1, 0.1 y 0.01 μm en números relativos y área superficial relativa, podemos observar, como se muestra en el cuadro 1.5, que mil millones de partículas de 0.01 μm equivalen al volumen y la masa de una partícula de 10 μm , y que mil millones de partículas de 0.01 μm tienen, en conjunto, un área superficial un millón de veces más grande que la partícula de

10 µm del mismo volumen promedio. Por lo anterior, y aunque el mayor número de partículas cae en los rangos de tamaño muy pequeños, las partículas gruesas contribuyen en una proporción muy grande de la masa y muy poco al número de partículas. También es importante recalcar que las partículas pequeñas en conjunto ofrecen una mayor área superficial, donde los compuestos tóxicos tienden a depositarse más fácilmente, lo que hace tan especial a este tamaño de partículas.

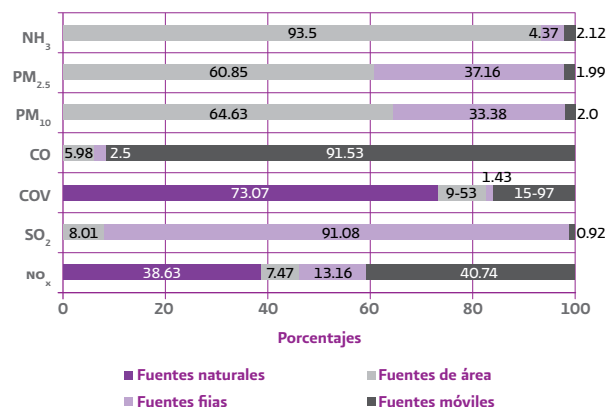
Diversos estudios han mostrado, por ejemplo, que los vehículos de diésel emiten poca masa de partículas, pero hay una emisión alta de partículas ultrafinas, las cuales, como se ha mencionado, pueden llegar hasta los alvéolos, y además en este rango de tamaño se concentran compuestos cancerígenos. Por ello, en países como Suiza se está viendo la necesidad de medir no solo la concentración de las partículas, sino también el número de partículas sólidas en el rango de tamaño 20-300 nm [8].

1.3 Fuentes emisoras de partículas

Hay varias formas de clasificar las fuentes de emisión de un contaminante; una de las más comunes es dividir las fuentes en fuentes antrópicas y fuentes naturales. Las fuentes antrópicas engloban las emisiones generadas por las actividades del hombre, mientras que las naturales son aquellas derivadas de fenómenos naturales donde no interviene el hombre.

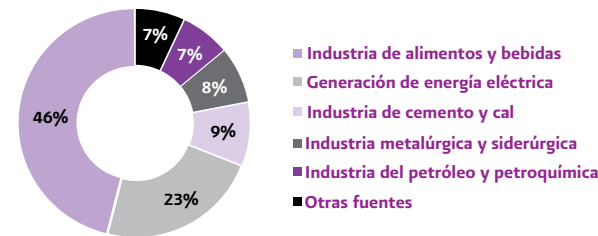
Las fuentes antrópicas, a su vez, se dividen en fuentes fijas o estacionarias, fuentes de área y fuentes móviles, mientras que las naturales se dividen en biogénicas y geogénicas. Esta clasificación sirve de base para compilar de una manera ordenada la información sobre las emisiones que se derivan de este tipo de fuentes, y en ella se basan los inventarios de emisiones. Tal es el caso del Inventario Nacional de Emisiones de México con año base 2005, del cual se extrae el porcentaje de contribución para cada contaminante criterio por cada tipo de fuente emisora

Figura 1.6 Contribución de emisiones contaminantes por categoría de fuentes en México, 2005



Fuente [22]

Figura 1.7 Contribución de emisiones de $PM_{2.5}$ por categoría de fuentes fijas en México (INEM, 2005)



Fuente [11]

(ver figura 1.6). La figura muestra que las emisiones de $PM_{2.5}$ provienen principalmente de las fuentes de área y de las fijas. A continuación se describen las principales subdivisiones y características de estas fuentes.

Fuentes antrópicas

Las fuentes antrópicas abarcan las emisiones generadas por las actividades hu-

manas, y algunos ejemplos de ellas son las emisiones provenientes de fábricas, automóviles, construcciones, tortillerías, quemas agrícolas, etc. Estas mismas fuentes se agrupan a su vez en tres subgrupos, como se describe a continuación.

Fuentes fijas o estacionarias

Estas fuentes se refieren a toda instalación establecida en un solo lugar y que tenga como propósito desarrollar procesos industriales, comerciales, servicios o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera. En este tipo de establecimientos, las emisiones de partículas primarias pueden generarse a través de actividades de combustión o como resultado de diversos procesos que se llevan a cabo dentro de las fuentes fijas.

Las emisiones de partículas por combustión dependen del tipo de combustible que se utiliza. Entre las fuentes fijas con actividades de combustión que contribuyen a las emisiones de partículas sobresalen las plantas generadoras de electricidad, especialmente aquellas que emplean carbón, y las plantas industriales y comerciales.

Los procesos industriales en general son también una fuente muy importante de partículas, y comúnmente las emisiones se generan como resultado de uno de los siguientes mecanismos:

- a) La molienda, trituración o abrasión de materiales. Un ejemplo es la molienda del clinker⁶ de cemento.
- b) La evaporación de materia volátil derivada de materiales sujetos a calentamiento.

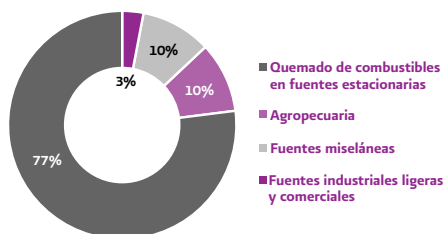
⁶ El clinker se forma tras calcinar caliza y arcilla a una temperatura que está entre 1350 y 1450 °C. Estos productos se muelen para fabricar el cemento Portland.

to, por ejemplo, la que se presenta en los hornos de vidrio y de metales no ferrosos.

- c) El arrastre de partículas finas en flujos gaseosos, como en el secado de los compuestos químicos por atomización.

En la figura 1.7 se muestra la contribución de diversas categorías de fuentes fijas que se reportaron en el Inventario Nacional de Emisiones de México 2005 (INEM, 2005) a las emisiones de $PM_{2.5}$. En esta gráfica se observa que el principal sector industrial emisor de partículas $PM_{2.5}$ es el de alimentos y bebidas, y los ingenios azucareros son los principales contribuyentes.

Figura 1.8 Contribución de emisiones de $PM_{2.5}$ por categoría de fuentes de área en México (INEM, 2005)



Fuente [11]

Fuentes de área

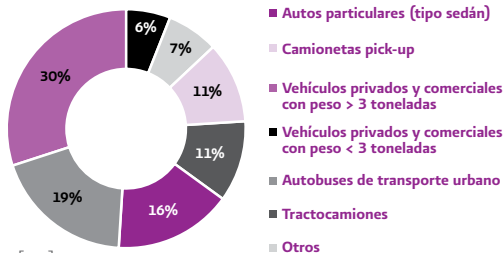
Las fuentes de área incluyen aquellas fuentes que son demasiado numerosas y dispersa, pero que en conjunto son emisoras significativas de contaminantes. Ejemplo de ellas son las gasolineras, tintorerías, actividades de construcción, quemas agrícolas, resuspensión de polvos de caminos, entre otras.

En la figura 1.8 se muestra la contribución de las fuentes de área que se reportaron para $PM_{2.5}$ en el Inventario Nacional de Emisiones de México 2005. La principal categoría emisora es la de quemado de combustibles en fuentes estacionarias, y dentro de esta categoría, la subcategoría de combustión doméstica de leña contribuye con aproximadamente el 74 % del total de las emisiones de fuentes de área.

Fuentes móviles

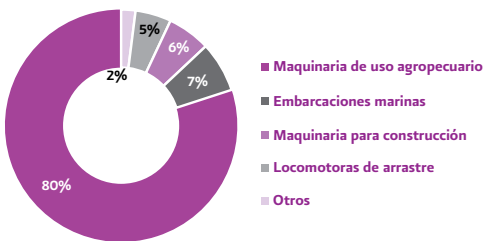
Las fuentes móviles que se incluyen en esta categoría son todas las fuentes motorizadas con autorización para circular por caminos públicos, como motocicletas, vehículos de pasajeros, camiones y autobuses, así como aquellas que no circulan por carretera, como maquinaria de uso agrícola, locomotoras, embarcaciones marinas, maquinaria para construcción, entre otras. Las emisiones de este tipo de fuentes son principalmente un producto de la combustión y evaporación de los combustibles utilizados, así como del desgaste tanto de los frenos como de las llantas.

Figura 1.9 Contribución de emisiones de PM_{2.5} por categoría de fuentes móviles que circulan por carretera en México (INEM, 2005)



Fuente [11]

Figura 1.10 Contribución de emisiones de PM_{2.5} por categoría de fuentes móviles que no circulan por carretera en México (INEM, 2005)



Fuente [11]

En las figuras 1.9 y 1.10 se muestran la contribución de las fuentes móviles que circulan por carretera y las que no circulan por carretera, respectivamente, de acuerdo con las estimaciones dadas en el INEM 2005 para PM_{2.5}. En el caso de las primeras, los vehículos privados y comerciales con peso superior a 3 toneladas son los mayores emisores, mientras que para las fuentes móviles que no circulan por carretera, este contaminante proviene de la maquinaria de uso agrícola.

Fuentes naturales

Las fuentes naturales se definen como aquellas que emiten contaminantes atmosféricos sin la participación de las actividades humanas. En algunas regiones, las emisiones naturales contribuyen de manera muy importante al total de las emisiones. Generalmente las fuentes naturales se clasifican en biogénicas y geogénicas o del suelo [12], aunque en términos de las emisiones de partículas únicamente contribuyen estas últimas.

Las fuentes geogénicas comprenden todas las de origen geológico, como los volcanes, y las que tienen que ver con el suelo; aunque en algunos casos también se consideran fuentes geogénicas los incendios forestales y la erosión eólica, de estas últimas hay discusiones sobre si se deben incluir, ya que si la erosión es ocasionada por cambios en la cobertura del suelo producidos por ac-

tividades humanas, como cultivos, quemas controladas o no controladas, adecuación de terrenos para pastoreo o vivienda, entre otras, ya no se deben considerar propiamente fuentes naturales.

El cuadro 1.6 presenta un resumen de las principales fuentes de emisión de las partículas ultrafinas, finas y gruesas.

Finalmente, el cuadro 1.7 presenta como complemento las fuentes de emisiones más relevantes para las principales especies que componen las partículas menores y mayores de las $PM_{2.5}$.

Cuadro 1.6 Principales fuentes de emisión de las partículas ultrafinas, finas y gruesas

	Tipo de Partículas		
	Ultrafinas ($PM_{0.1}$)	Finas ($\leq PM_{2.5}$)	Gruesas (PM_{10} - $PM_{2.5}$)
Fuentes de emisión	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión de alta temperatura • Reacciones atmosféricas de compuestos gaseosos primarios 	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión fósil y combustible de biomasa, temperatura alta de procesos industriales, fundidoras, refinerías, aceras, etc. • Oxidación atmosférica de NO_2, SO_2 y compuestos orgánicos, incluidos especies orgánicas biogénicas, por ejemplo, terpenos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resuspensión de partículas depositadas en las calles • Llantas, residuos de los caminos y de balatas de freno • Suspensión de suelos (cultivos, minería, calles no pavimentadas) • Construcción y demolición • Cenizas de combustión de carbón no controlado, petróleo y madera • Brisa marina

Fuente [9]

Cuadro 1.7 Principales fuentes de emisión de la fracción de partículas

Especies	<PM _{2.5}		>PM _{2.5}	
	Naturales	Antrópicas	Naturales	Antrópicas
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	Aerosoles marinos	Quema de combustibles fósiles	Aerosoles marinos	----
Nitratos (NO ₃ ⁻)	--	Tubos de escape de vehículos	—	—
Minerales	Erosión y re-suspensión	Polvos fugitivos de caminos pavimentados y no pavimentados, agricultura, construcción, demolición	Erosión y re-suspensión	Polvos fugitivos de caminos pavimentados y no pavimentados, agricultura, construcción, demolición
Amonio (NH ₄ ⁺)	---	Tubos de escape de vehículos	—	—
Carbón orgánico	Incendios naturales	Quema de madera, tubos de escape de vehículos, cocinar, desgaste de llantas y procesos industriales	Materia húmica del suelo	Desgaste de llantas y pavimento, polvo de caminos pavimentados y no pavimentados
Carbón elemental	Incendios naturales	Quema de madera, tubos de escape de vehículos (principalmente diésel), cocinar	—	Desgaste de llantas y pavimento, polvo de caminos pavimentados y no pavimentados
Metales	Actividad volcánica	Combustión de combustibles fósiles, procesos metalúrgicos, desgaste de frenos de vehículos	Erosión y re-suspensión	—
Aerosoles biológicos	Bacterias y virus	—	Fragmentos de plantas e insectos, polen, esporas y bacterias	—

Fuente (9)

1.4 Referencias

1. Environment Canada and Health Canada (2000), "Priority Substances List Assessment Report, Respirable Particulate Matter Less Than or Equal to 10 Microns". Canadian Environmental Protection Act, 1999.
2. European Commission (2004), "Second Position Paper on Particulate Matter". CAFE Working Group on Particulate Matter.
3. <http://chriscolose.wordpress.com/2008/04/13/the-uncloudy-cretaceous/>. Consultado 15 de noviembre, 2010.
4. World Health Organization Europe (2005), "Air Quality Guidelines. Global Update 2005. Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide."
5. Environmental Protection Agency. Consultado 10 de noviembre, 2010. <http://www.epa.gov/airsceince/quick-finder/particulate-matter-image.htm>
6. Environmental Protection Agency (1996), "Sampling of Ambient Air for Total Suspended Particulate Matter (SPM)". Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air". EPA/625/R-96/010A.
7. Instituto Nacional de Ecología. Consultado 26 de octubre, 2010. <http://www.ine.gob.mx/component/content/article/73-dica/523-calaire-cont-criterio>
8. Department for Environment, Food and Rural Affairs; Scottish Executive; Welsh Assembly Government y Department of the Environment in Northern Ireland (2005), "Particulate Matter in the United Kingdom".
9. Environmental Protection Agency (2009), "Integrated Science Assessment for Particulate Matter". EPA/600/R-08/139F.
10. <http://elements.geoscienceworld.org/cgi/content/full/4/6/389/FIG3>. Consultado 10 de noviembre, 2010.
11. INE-SEMARNAT (1997), "Emissions Inventory Fundamentals", Vol. II. RCN 670017 5104. Mexico Emissions Inventory Program Manuals. Prepared by Radian International LLC.
12. Environment Canada and Health Canada (1998), "National Ambient Air Quality Objectives for Particulate Matter". Executive Summary. Part 1: Science Assessment Document. CEPA/FPAC Working Group on Air Quality Objectives and Guidelines.
13. INE-SEMARNAT (2009), "Estudio sobre la variabilidad estacional de la composición y toxicidad de partículas finas en el valle de México". Segundo Reporte Técnico.

14. Sosa I., G. (2009), "Recent Studies in the MCMA and Their Implications on air Quality Management". Trabajo presentado en el Seminario Internacional sobre Calidad del Aire y Efectos a la Salud. Diciembre 2-3, México, D.F.
15. Aiken A. C., Salcedo D., Cubison M. J., Huffman J. A., DeCarlo P. F., Ulbrich I. M., Docherty K. S., Sueper D., Kimmel J. R., Worsnop D. R., Trimborn A., Northway M., Stone E. A., Schauer J. J., Volkamer R. M., Fortner E., de Boy B., Wang J., Laskin A., Shutthanandan V., Zheng J., Zhang R., Gaffney J., Marley N. A., Paredes-Miranda G., Arnott W. P., Molina L. T., Sosa G., y Jimenez J. L., (2009), "Mexico City Aerosol Analysis during MILAGRO using High Resolution Aerosol Mass Spectrometry at the Urban Supersite (T0)–Part 1: Fine Particle Composition and Organic Source Apportionment". *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6633-6653.
16. Osornio A., Flores G., Vázquez I., García C., Rosas I., García A., Miranda J., Serrano J., Rojas L., Zuk M., López T., Reyna M. A., Quintero M., Clark I., "Toxicological Evaluation of PM_{2.5} and PM₁₀ in the City of Mexicali and its Correlation with Soil Content". LASPAU 2005–2007.
17. He K., Yang F., Ma Y., Zhang Q., Yao X., Chan C. K., Cadle S., Chan T., y Mulawa, P.: The characteristic of PM_{2.5} in Beijing, China, *Atmos. Environ.*, 38, 29, 4959–4970, 2001.
18. Christoph Hueglin et al (2005), "Chemical Characterization of PM2.5, PM10 and Coarse Particles at Urban, Near-city and Rural Sites in Switzerland". *Atmospheric Environment* 39, 637-651.
19. L. Negral, S. Moreno-Grau, J. Moreno, X. Querol, M. Viana y A. Alastuey. (2008), "Natural and Anthropogenic Contributions to PM10 and PM2.5 in an Urban Area in the Western Mediterranean Coast". *Water Air Soil Pollut*, 192:227-238.
20. Schaap, M., Denier Van Der Gon, H. A. C., Visschedijk, A. J. H., Van Loon, M., ten Brink, H. M., Dentener, F. J., Putaud, J-P., Guillaume, B., Liousse, C., y Builtjes, P. J. H. (2004), "Anthropogenic Black Carbon and Fine Aerosol Distribution over Europe". *Journal of Geophysical Research*, Vol.109, D18207.
21. N. Pérez, J. Pey, X. Querol, A. Alastuey, J. M. López, M. Viana. (2008), "Partitioning of major and trace components in PM10-PM2.5-PM1 at an Urban Site in Southern Europe". *Atmospheric Environment* 42, 1677-1691.
22. INE-SEMARNAT (2011), "Inventario Nacional de Emisiones de México, 2005".