

Importancia de las partículas PM_{2.5}

Las políticas en salud pública, en términos de estándares o niveles máximos permisibles de concentración de partículas ambientales, se han enfocado en los últimos años en las partículas finas PM_{2.5}, aunque algunos estándares para partículas gruesas PM₁₀ siguen también vigentes. Varios estudios sugieren que las partículas PM_{2.5} tienen un efecto mayor en la salud humana debido principalmente a su composición, que puede ser más tóxica y se caracteriza principalmente por la presencia de sulfatos, nitratos, ácidos, metales y carbono negro; este último contaminante se origina en las diferentes categorías de fuentes de emisión que implican la quema incompleta de combustibles, y su presencia en las partículas incrementa considerablemente su toxicidad [46]. Además, en comparación con las partículas más grandes, las PM_{2.5} poseen una mayor área superficial [1], en la cual tienden a depositarse especies químicas dañinas para la salud humana. Asimismo hay que recordar que las partículas PM_{2.5}, a diferencia de las partículas más gruesas, al ser respiradas pueden llegar a los conductos más bajos de los pulmones y provocar importantes afectaciones a la salud humana (ver cuadro 2.1). Por otro lado, las partículas en este rango de tamaño permanecen durante periodos más largos suspendidas en la atmósfera, viajando distancias más largas y penetrando en los interiores de las casas, oficinas, etc., y por lo tanto la población está expuesta durante periodos más prolongados a esta fracción de partículas.

La contaminación atmosférica, debido a la presencia de partículas suspendidas, no solo tiene un efecto en la salud humana, sino que también puede provocar un efecto negativo sobre el medioambiente. Algunos ejemplos de

Cuadro 2.1 Penetrabilidad de las partículas en el tracto respiratorio según su tamaño

Tamaño de partícula (µm)		Región hasta donde puede ocurrir la penetración
>	11	Capturadas en orificios nasales; no penetran en la parte baja del tracto respiratorio
7	– 11	Pasaje nasal
4.7	– 7	Región de la laringe
3.3	– 4.7	Tráquea y región primaria bronquial
2.1	– 3.3	Región bronquial secundaria
1.1	– 2.1	Región bronquial terminal
0.65	– 1.1	Bronquiolos
0.43	– 0.65	Alveolos

Fuente [2]

estos efectos son la deposición ácida, la afectación de la visibilidad, el balance radiativo de energía (el cual está relacionado con el cambio climático) y la eutroficación, entre otros. Estos fenómenos, junto con los efectos de las $PM_{2.5}$ en la salud humana, se describen a continuación.

2.1 Impactos en la salud

Los efectos negativos de las partículas suspendidas en la salud humana parecen haber existido desde tiempos muy remotos. La primera evidencia documentada del impacto de este contaminante sobre la salud se remonta al año 1800 antes de nuestra era, cuando al examinar la momia encontrada en el desierto de Gobi, conocida como Beaty de Loulan, se observó que sus pulmones estaban muy dañados. Los arqueólogos atribuyeron su muerte a problemas respiratorios causados por emisiones de combustión de madera y por partículas de arena [3].

Actualmente, numerosos estudios epidemiológicos realizados en muchos países del mundo han determinado que la exposición a la contaminación provocada por partículas $PM_{2.5}$ presenta asociaciones positivas entre este contaminante y las tasas de mortalidad y morbilidad de la población expuesta. Los efectos en la salud relacionados con la presencia de partículas suspendidas han sido observados a concentraciones que actualmente ocurren en diversos lugares del planeta. Por lo anterior, se considera que cuando las partículas suspendidas, y en especial las partículas $PM_{2.5}$, entran al medioambiente, constituyen o pueden constituir un peligro para la salud, e incluso para la vida humana [1].

Estudios recientes demuestran que el carbono negro forma parte de las $PM_{2.5}$, y que una vez emitido a la atmósfera puede causar diversos impactos tanto en el medioambiente como en la salud de las personas debido a su elevada toxicidad, a su porosidad y a su amplia superficie de contacto. Este contaminante puede adsorber una gran variedad de químicos durante el proceso de combustión, incluidos los hidrocarburos aromáticos policíclicos, que son carcinogénicos o mutagénicos [47]. Es por ello que algunos países desarrollados han incorporado a sus inventarios de emisiones las de carbono negro, lo que permite a su vez la estimación de los impactos en la salud por la presencia de este contaminante en la atmósfera.

Mortalidad y morbilidad

Se han realizado muchos estudios para relacionar la contaminación provocada por la presencia de partículas PM_{2.5} en la atmósfera con diversos impactos en la salud. Los primeros estudios realizados se enfocaron en la evaluación de los efectos por la exposición a este contaminante en episodios severos de contaminación atmosférica. Posteriormente los estudios se enfocaron en el efecto de estos contaminantes en concentraciones comúnmente presentes en zonas poblacionales y aun en concentraciones más bajas. En ambos casos se han reportado asociaciones entre la presencia de partículas PM_{2.5} y casos de mortalidad y de morbilidad [6-17].

Para cuantificar estas asociaciones se han realizado estudios toxicológicos y epidemiológicos. Los primeros evalúan la respuesta de un organismo determinado a la exposición al contaminante en condiciones controlada, y se realizan, por cuestiones éticas, con animales de laboratorio; los segundos abarcan grupos de personas, sus padecimientos o las causas de su muerte, y buscan la relación de estos con las circunstancias que los provocaron [18]. Dentro de esta última clasificación tenemos, por ejemplo, los estudios epidemiológicos ambientales; en estos se valora la asociación entre la exposición a algún agente ambiental, como las partículas PM_{2.5}, con la mortandad prematura de personas o con la presencia de padecimientos, síntomas e ingresos a hospitales. Los resultados de este tipo de estudios están principalmente en función de la proporción de personas o individuos considerados enfermos o víctimas de una enfermedad en un tiempo determinado en relación con la población total de ese lugar.

Por otro lado, de los estudios toxicológicos se deriva información que sustenta la plausibilidad biológica⁷ de la asociación entre la exposición al contaminante y el efecto en la salud. Esta base es crítica para la elaboración posterior de estudios epidemiológicos que establecen funciones exposición-respuesta y que, a su vez, dan sustento a los estándares de emisión de contaminantes y de calidad del aire. A través de la información generada por los estudios toxicológicos se pueden identificar las características de las partículas que determinan su toxicidad, lo cual podría servir de base para que en un futuro se considere la posibilidad de incluir, como parte del indicador de calidad del aire referente a las partículas, su composición [6].

⁷ Es la coherencia con el conocimiento biológico vigente.

Muchos de los estudios que establecen la relación de la exposición a partículas y el efecto en la salud han identificado que los efectos directos se dan en el tracto respiratorio y que hay producción de anticuerpos [6]. Otros efectos que pueden causar las partículas al ingresar al sistema sanguíneo son incrementar el riesgo de una embolia o un infarto, o bien acelerar la aterosclerosis⁸ cuando hay una exposición crónica⁹ a éste contaminante.

El efecto de la exposición a partículas PM_{2.5} en las admisiones hospitalarias puede variar dependiendo de la época o estación del año y la región. Algunos estudios en Estados Unidos han señalado que en el noreste de este país durante el verano se presenta una mayor incidencia de mortalidad y admisiones hospitalarias [19]. Estas diferencias regionales y temporales pueden deberse a variaciones en la composición de las partículas PM_{2.5} y sus fuentes. Por ejemplo, se ha encontrado que muchos componentes, como nitratos, Cl, Zn, Ni, Br y carbón elemental, están presentes en mayor cantidad en invierno que en verano, mientras que las concentraciones de Al, Ti, Mg, Si y sulfatos son más altas en verano que en invierno. También hay elementos cuya concentración no muestra ninguna influencia estacional, como Sb, Cd y Cr. Por otro lado, Zanobetti y colaboradores [13] realizaron un estudio en 26 comunidades de Estados Unidos durante los años 2000-2003, e identificaron que las admisiones hospitalarias diarias aumentaron entre 1 % y 2 % por cada incremento de 10 µg/m³ en la concentración de partículas PM_{2.5} durante dos días seguidos. En el cuadro 2.2 se observan algunos resultados obtenidos de este estudio.

En este mismo contexto, Landen y colaboradores [14] continuaron un estudio realizado anteriormente, donde encontraron también un aumento en la mortalidad por cáncer pulmonar y muertes cardiovasculares asociado con un cambio de 10 µg/m³. A la par, estos autores encontraron que si hay una reducción en la concentración de PM_{2.5}, se reduce el riesgo de mortalidad relacionada con problemas cardiovasculares y respiratorios, pero no se encontró el mismo efecto para el caso de cáncer de pulmón.

Otro punto importante a resaltar es la vulnerabilidad de algunos grupos poblacionales; por ejemplo, los niños y las personas mayores, así como las personas con

8 Acumulación de depósitos adiposos llamados "placa" en el interior de las paredes de las arterias.

9 Contacto con una sustancia que se produce durante un periodo largo (más de 1 año en el caso de los seres humanos).

enfermedades cardiovasculares, asma o influenza, son más susceptibles de fallecer o presentar efectos de morbilidad debido a exposiciones agudas¹⁰ a contaminantes atmosféricos [20].

Estudios realizados en México

Muchos de los estudios realizados en México sobre la relación entre la exposición a partículas ambientales y diversos impactos en la salud se han enfocado hacia las partículas PM₁₀ [21-26], varios de ellos realizados con la participación de investigadores del Instituto Nacional

de Salud Pública, lo que hace a esta institución una de las líderes en este campo de investigación en México. Muchos de estos estudios corroboran la relación entre la exposición a partículas PM₁₀ e indicadores de mortalidad y morbilidad. Por otro lado, L. T. Molina y M. J. Molina hacen un recuento de algunos otros trabajos, también realizados en México, en su publicación LA CALIDAD DEL AIRE EN LA MEGACIUDAD DE MÉXICO [27]. A continuación se resumen algunos de los trabajos realizados en México sobre PM_{2.5} y su afectación a la salud humana.

Borja-Aburto y colaboradores [28] investigaron la relación estadística de varios contaminantes atmosféricos con los impactos en la salud de la población, entre ellos las partículas PM_{2.5}; encontraron una relación similar a la que se ha reportado para las PM₁₀, que consiste en que por cada incremento de 10 µg/m³ en la concentración de este tamaño de partícula se observaba un incremento de 1.4 % en la mortalidad prematura a corto plazo. Otro resultado importante de este trabajo fue la relación entre las PM_{2.5} y el aumento en el número de muertes de personas mayores de 65 años por causas respiratorias y cardiovasculares. Osornio-Vargas y colaboradores [29] realizaron experimentos *in vitro* para analizar los efectos citotóxicos y proinflamatorios de partículas PM₁₀ y PM_{2.5} que fueron colectadas en la ciudad de México; para ambos tamaños de partículas se observaron efectos adversos en las células expuestas. Para el caso de las PM_{2.5} se encontró un efecto citotóxico más dañino,

Cuadro 2.2 Efectos de la composición de las PM_{2.5} en los ingresos hospitalarios de 26 comunidades de Estados Unidos

Tipo de causas de admisión	Compuesto causante	Porcentaje de incremento en admisiones hospitalarias
Cardiacas	Br, Cr, Ni y Na ⁺	1.89
Infarto del miocardio	As, Cr, Mn, carbón orgánico, Ni y Na ⁺	2.25
Diabetes	As, carbón orgánico y sulfatos	2.74

Fuente [13]

¹⁰ Contacto con una sustancia que ocurre una sola vez o durante un periodo corto (hasta 14 días en el caso de los seres humanos).

Cuadro 2.3 Efectos de las partículas y otros contaminantes sobre los ecosistemas

- Acumulación de contaminantes en plantas y otros componentes del ecosistema (como suelo y aguas superficiales y subterráneas)
- Daño a consumidores como resultado de la acumulación de contaminantes en organismos y alimentos
- Cambios en la diversidad de especies debido a la competencia
- Alteración de los ciclos biogeoquímicos
- Alteración de la estabilidad y reducción de la capacidad de autorregularse
- Rompimiento de asociaciones
- Expansión de zonas áridas

mientras que las partículas PM_{10} indujeron mayores efectos proinflamatorios.

Por otro lado, Barraza-Villareal y colaboradores [30] llevaron a cabo un estudio en el que se dio seguimiento a 158 niños asmáticos y 50 niños no asmáticos durante 22 semanas, y se encontró que la exposición a partículas $PM_{2.5}$ resultó en una inflamación severa de las vías respiratorias y en el decremento de las funciones de los pulmones, tanto en los niños asmáticos como en los no asmáticos.

En otro estudio [31] se encontró que la sibilancia fue el síntoma que mostró mayor relación con la exposición a partículas derivadas del tráfico, ya que por cada incremento de $17.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de $PM_{2.5}$, hubo un aumento del 8.8% en este síntoma. Otros trabajos similares se pueden consultar en otras publicaciones [32, 33 y 34].

2.2 Impactos en el medioambiente

Una vez que las partículas $PM_{2.5}$ se emiten a la atmósfera, son transformadas o transportadas por procesos atmosféricos y finalmente depositadas, y provocan la degradación de bosques, lagos y suelos, daños a la vida silvestre y humana, así como la corrosión de los materiales de los edificios o construcciones. Durante su permanencia en la atmósfera, las partículas provocan diversos impactos al ambiente; uno de ellos es la disminución de la visibilidad, y otro, su efecto en el cambio climático. Todos estos procesos se describen más adelante en esta sección. En el cuadro 2.3 se resumen algunos de los posibles efectos de las partículas y otros contaminantes atmosféricos sobre los ecosistemas [35 y 36].

Procesos de remoción de partículas

Los ecosistemas están a menudo sujetos a múltiples presiones ambientales, por ejemplo, la deposición de las partículas ambientales. Por otro lado, la deposición es también uno de los mecanismos más importantes de remoción de partículas ambientales y de otros contaminantes de la atmósfera.

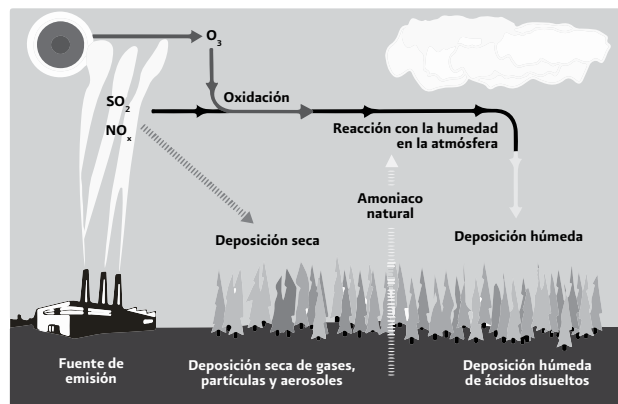
Como se muestra en la figura 2.1, la deposición puede ser húmeda o seca. La deposición seca es un proceso complejo muy poco caracterizado y que parece ser controlado primordialmente por las siguientes variables: estabilidad atmosférica, rugosidad de las superficies y diámetro de la partícula. Este proceso afecta a todas las superficies expuestas, incluidas también las acuáticas. Mientras que las partículas mayores a $5\ \mu m$ caen a la superficie de la tierra, principalmente por gravitación e impactación inercial, las partículas $PM_{2.5}$ no se remueven rápidamente, sino que viajan grandes distancias antes de su eventual remoción, generalmente por deposición húmeda. La deposición húmeda se produce con la incorporación de partículas atmosféricas y gases en las gotas que forman las nubes y con la subsecuente remoción de la atmósfera como lluvia o nieve; también se produce cuando las partículas son recogidas por las gotas de lluvia o nieve conforme estas caen.

Las partículas, entonces, pueden ser depositadas en las hojas de las plantas, los árboles, el suelo en general, las construcciones, etc. Las lluvias de gran abundancia remueven muchas de las partículas acumuladas por deposición seca en las superficies foliares; ambas deposiciones se combinan y se transfieren en conjunto al suelo, donde los constituyentes de las partículas pueden afectar a los ciclos biogeoquímicos. A continuación se describen algunos de los efectos de la deposición de la atmósfera en los ecosistemas, tanto terrestres como acuáticos, y en los edificios o construcciones.

Efectos en ecosistemas terrestres

La deposición de partículas $PM_{2.5}$ en los ecosistemas terrestres, tanto en vegetación como en suelo, puede producir respuestas dentro del ecosistema que dependen de la composición química de las partículas. Esta respuesta será una función directa del grado de sensibilidad del propio ecosistema y de su habilidad para manejar el cambio resultante. Entre los efectos importantes que se han observado por la precipitación de partículas están la reducción de la fotosíntesis, cambios en la salinidad del suelo,

Figura 2.1 Esquema de la deposición de partículas suspendidas



Fuente [37]

efectos en el follaje, la reducción del crecimiento, la reducción del florecimiento y una disminución de los procesos reproductivos. Esto es resultado, principalmente, de la precipitación de nitratos, sulfatos y metales pesados, entre otros compuestos. Las partículas que se depositan en los ecosistemas terrestres pueden asentarse en las hojas, las ramas o la superficie de la corteza durante largos periodos, y pueden ser absorbidas en la superficie de las hojas o removidas, ya sea por un proceso de resuspensión de las partículas, por la lluvia, o simplemente se pueden caer al suelo. Muchos de los efectos más importantes que tienen las partículas se presentan precisamente en el suelo, ya que alteran los procesos de flujo de energía y el ciclo de nutrientes, inhiben la toma de nutrientes, cambian la estructura del ecosistema y, sobre todo, afectan a su biodiversidad.

La acidificación es otro de los efectos de la precipitación, y ocurre cuando los compuestos ácidos exceden la capacidad neutralizadora del medioambiente receptor [37]. El agua de lluvia no contaminada tiene un pH de alrededor de 5.6, mientras que el pH del agua de lluvia ácida varía entre 4 y 5. La disminución de un solo punto en el pH representa un aumento de acidez de diez veces. Un efecto encontrado en especies coníferas y deciduas cuando fueron expuestas a lluvias ácidas de pH 3.5 fue que se dañaron las estructuras superficiales de las hojas. También se ha documentado que la lluvia ácida afecta a la cera epicuticular foliar, la cual sirve para evitar la pérdida de agua, además de que la pérdida de la cera provoca envejecimiento de las agujas de las especies coníferas. En la figura 2.1 se muestra un esquema de la precipitación ácida.

Otros componentes de las partículas $PM_{2.5}$ son los metales, que también se depositan en los bosques y se acumulan en las capas superiores del suelo; generalmente la concentración de metales tiende a decrecer con la profundidad del suelo. Uno de los problemas que causa la presencia de los componentes metálicos de las partículas en el suelo, sobre todo en altas concentraciones, es que disminuye el proceso natural de descomposición de hojas, raíces y animales muertos. Además, se inhibe la toma de nutrientes por las raíces, lo que altera el ciclo de la nutrición. También se ven afectados los microorganismos del suelo con la presencia de los metales; por ejemplo, se ha reportado que altas concentraciones de Pb, Zn y Cu reducen la presencia de microorganismos, y la actividad enzimática es mucho más baja que la de un suelo no contaminado. Uno de los puntos también muy importantes es que estos metales pueden bioacumularse y entrar fácilmente en la cadena alimenticia,

para afectar a los animales y a los humanos. Un indicador de la presión inducida por los metales es la generación de fitoquelatos, que son producidos por las plantas para contrarrestar las concentraciones letales de metales pesados; el incremento en la concentración de los fitoquelatos está asociado con un incremento en la cantidad de bosques afectados.

Efectos en ecosistemas acuáticos

La precipitación atmosférica de las partículas suele ser una importante fuente de metales en los cuerpos de agua. Entre estos metales se incluyen elementos comunes de la tierra, como Al, Ca, K, Fe, Mg, Si y Ti, y elementos de origen antrópico, como Cu, Zn, Cd, Cr, Mn, Pb, V y Hg. La precipitación de estos metales depende de su localización y de las fuentes de emisiones viento arriba, por lo que se puede esperar que en los cuerpos de agua que se localicen inmediatamente viento abajo se produzcan deposiciones secas importantes.

Entre los metales que causan mayor preocupación está el mercurio; la presencia de este metal en los lagos es uno de los problemas ambientales más fuertes en muchos países del hemisferio norte, ya que, una vez depositado en la superficie de los cuerpos de agua, entra en la cadena alimenticia de los humanos a través de la ingesta de peces contaminados por este elemento.

Los compuestos orgánicos, como los compuestos orgánicos persistentes, los pesticidas y los hidrocarburos poliaromáticos, son otros componentes de las partículas que pueden afectar a los ecosistemas acuáticos; se ha demostrado que los peces acumulan los pesticidas (DDT y dieldrin) en mayores cantidades que la vegetación [35].

Los sistemas acuáticos también se ven afectados por la precipitación ácida. Según la EPA [38], los efectos de la lluvia o precipitación ácida se ven más claramente en los ambientes acuáticos. En principio, hay dos formas de que la lluvia ácida llegue hacia estos ecosistemas: fluye a los lagos, pantanos, ríos y arroyos después de depositarse en bosques, campos, edificaciones, caminos, etc., pero también puede entrar al ecosistema directamente. Entre los efectos más importantes provocados por la lluvia ácida en los ecosistemas acuáticos están los que sufren los peces; los impactos pueden implicar su muerte, lo que trae aparejada una reducción de su población o la eliminación por completo de especies de una masa de agua.

Efectos en edificios y construcciones

En general, la contaminación atmosférica afecta a los materiales de edificios y construcciones desde dos puntos de vista: apariencia estética y daños físicos. Las partículas que se depositan en las superficies de los edificios y construcciones causan el ensuciamiento de los materiales de construcción y monumentos históricos, como las estatuas.

El ensuciamiento generalmente se considera un efecto óptico, ya que cambia la reflectancia de los materiales opacos y reduce la transmisión de luz a través de los materiales transparentes. Con el ensuciamiento hay un aumento de la frecuencia de limpieza de ventanas y estructuras de concreto, así como acciones de repintado, y en algunos casos reduce la vida útil del objeto. Las partículas, esencialmente de carbón, pueden ser un agente catalizador para promover reacciones químicas que deterioren los materiales. Otros compuestos de las $PM_{2.5}$ que contribuyen al ensuciamiento son el carbón orgánico y el carbón elemental, aunque el primero predomina. Otro aspecto identificado es que las partículas depositadas sirven como fuente de crecimiento para colonias de microorganismos, que también tienen un efecto de ensuciamiento importante.

También se ha observado que ciertos aniones orgánicos de bajo peso molecular, como el formiato de metilo, el acetato y los oxalatos, presentes en las partículas ambientales, dañan los materiales de las construcciones. Estos compuestos se han encontrado en las capas negruzcas de muchos edificios, tanto en sitios urbanos como suburbanos y rurales. Además, la precipitación de partículas también afecta a diversos metales, lo que contribuye a su corrosión.

Reducción de la visibilidad

Uno de los efectos más inmediatos de la contaminación atmosférica, y en especial de la presencia de partículas $PM_{2.5}$, es la reducción de la visibilidad. La visibilidad se define como la distancia desde la que un objeto puede ser percibido contra el cielo como horizonte sin una distinción exacta de sus detalles. La posibilidad de ver un objeto en la forma descrita depende de la transmisión de la luz en la atmósfera y del contraste con el fondo, ambos influidos por los procesos de absorción y dispersión atmosférica.

En regiones donde la concentración de partículas fluctúa alrededor de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la visibilidad media es de 50 a 60 km. Por el contrario, en las áreas urbanas donde la

concentración de partículas excede los 100 µg/m³, la visibilidad promedio se reduce a 8 o 10 km. La reducción de la visibilidad es una de las pruebas más evidentes del aumento de contaminación por partículas. En la ciudad de México la visibilidad promedio en enero de 1937 era de 10 a 15 km, y al principio de la década de los años 70 disminuyó entre 2 y 4 km [39].

Los sulfatos y nitratos, principales componentes de las PM_{2.5}, contribuyen a la disminución de la visibilidad. En el este de Estados Unidos las partículas de sulfato producen del 50 % al 70 % de la reducción de la visibilidad, mientras que en la parte occidental de este país el nitrato y el carbón también juegan un papel importante, pero los sulfatos se han identificado como uno de los responsables principales de la disminución de la visibilidad en muchos de los parques nacionales de Estados Unidos [40].

Impactos relacionados con el cambio climático

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) señala a las partículas ambientales o aerosoles como uno de los contaminantes atmosféricos con mayor impacto en el clima, a pesar de que tienen una vida media más corta que los gases de efecto invernadero.

Establecer cuál es el efecto de las partículas ambientales en el clima ha sido un gran desafío, tanto por la variedad del tamaño de las partículas en la atmósfera, su composición y origen, como por sus distribuciones espaciales y temporales. Sin embargo, los efectos radiativos de las partículas han quedado bien establecidos, y se producen de dos formas: el efecto directo, por el que las partículas dispersan y absorben radiación infrarroja solar y térmica, y el efecto indirecto, en el que las partículas modifican las propiedades de la nubosidad [41].

Los sulfatos, los nitratos y el carbón orgánico pueden reflejar la radiación solar incidente y dar lugar a un efecto de enfriamiento, pero otros componentes de las partículas, como el hollín (carbono negro), absorben la radiación solar y contribuyen al calentamiento. Ambos efectos afectan al balance radiativo global y se cuantifican a través del término "forzamiento radiativo"; este se define como la medida de la influencia que un factor ejerce en la modificación del equilibrio entre la energía entrante y saliente en el sistema Tierra-atmósfera, y es un índice de la importancia del factor como mecanismo potencial de cambio climático [42]. En este contexto,

Cuadro 2.4 Valores de forzamiento radiativo para algunos aerosoles

Tipo de aerosol	Forzamiento radiativo (Wm ⁻²)
Sulfatos	-0.4
Carbón orgánico	-0.1
Hollín	+0.2

Fuente [41]

las partículas que tienen un efecto de enfriamiento presentan un forzamiento radiativo negativo, y aquellas que tienen un forzamiento radiativo positivo son las que favorecen el calentamiento. Algunos ejemplos de aerosoles con un forzamiento radiativo negativo son los generados en las erupciones volcánicas. En el cuadro 2.4 se muestran los valores de forzamiento radiativo para algunos tipos de aerosoles.

Respecto a los efectos indirectos, se ha observado que las partículas actúan como núcleos de condensación (CNN, por sus siglas en inglés), en los que el vapor de agua puede acumularse durante la formación de las nubes [41]. Cualquier cambio en la concentración o en las propiedades higroscópicas de tales partículas puede modificar las propiedades radiativas y físicas de las nubes en dos formas principalmente: en la luminosidad de la nube y en la probabilidad e intensidad con la cual una nube se precipita. Por otro lado, se cree que la absorción de la radiación solar por las partículas contribuye a la reducción del nublado, proceso referido como un efecto semidirecto derivado de la presencia de las partículas en la atmósfera. Esta reducción ocurre porque la radiación que absorben las partículas calienta la atmósfera, lo cual cambia la estabilidad atmosférica y reduce el flujo solar en la superficie.

En general, las partículas llegan a dispersar más del 90 % de la luz visible que les llega, lo cual produce que la atmósfera brille, efecto que se podría observar desde el espacio, ya que contrasta con la superficie de la Tierra, que es generalmente negra debido a que una buena parte está ocupada por océanos. En conclusión, las partículas aumentan la reflectancia del planeta, lo que reduce la cantidad de luz solar que llega a la superficie de la Tierra, produciendo un efecto de enfriamiento, así como una redistribución de la energía que está en la atmósfera. Estos efectos pueden alterar la circulación atmosférica y el ciclo del agua, así como los patrones de precipitación a todas las escalas.

2.3 Normas y estándares aplicables

Las normas o estándares para los contaminantes se emiten con el objetivo de establecer los límites para sus emisiones provenientes de diversas fuentes, o bien, las concentraciones ambientales bajo las cuales se puede considerar que hay una buena calidad del aire. En las secciones siguientes se describen aquellos estándares y normas, nacionales e internacionales, que se refieren a las partículas PM_{2.5}.

Normas y estándares que limitan las emisiones

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la dependencia encargada de establecer normas que señalen los límites de emisión de partículas para diferentes fuentes. Sin embargo, en el país no existe una norma específica de emisión para partículas PM_{2.5}. En cambio, existen normas de emisión para partículas totales en procesos específicos, así como para vehículos nuevos de varios pesos y que queman diferentes combustibles, para fuentes fijas y para aquellas fuentes que queman combustibles fósiles. Estas normas pueden ser consultadas en la página de Internet de la SEMARNAT y se resumen en el cuadro 2.5.

Normatividad que establece el valor permisible para la concentración de PM_{2.5} en el aire ambiente

Las normas y los estándares que limitan las concentraciones ambientales se han generado para el cuidado de la salud de la población. En esta sección se hace una comparación entre la norma mexicana y las existentes en otros países.

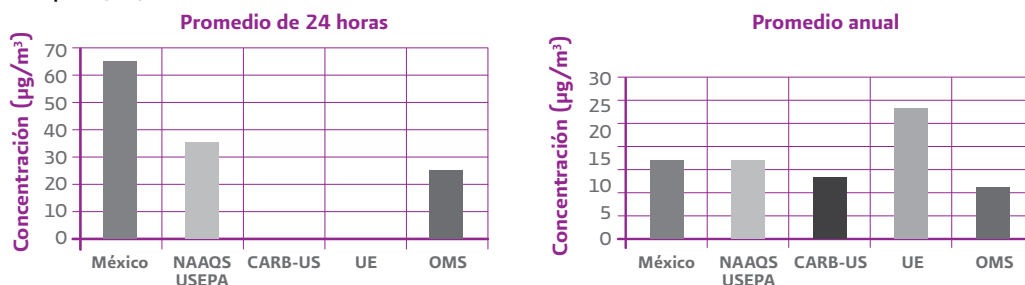
Normas oficiales mexicanas

La Secretaría de Salud es la dependencia encargada del establecimiento de normas para cuidar la calidad del aire en nuestro país. Originalmente, esta dependencia emitió en 1994 la Norma Oficial Mexicana NOM-024-SSA1-1993, en la que estableció el valor permisible para la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente. En ese mismo año se publicó la NOM-025-SSA1-1993 para las partículas PM₁₀, y posteriormente se combinaron las dos normas anteriores y se incluyó el límite máximo permisible para PM_{2.5} en la NOM-025, que se publicó en el *Diario Oficial de la Federación* en 2005. En esta norma se estableció el valor de 65 µg/m³ como límite para la concentración promedio de 24 horas, y 15 µg/m³ como límite para la concentración promedio anual. Los valores establecidos en esta norma así como en

Cuadro 2.5 Normas mexicanas que establecen los niveles máximos de emisión de partículas a la atmósfera para diferentes tipos de fuentes

NORMA	APLICACIÓN
Emisiones de fuentes fijas	
NOM-040-SEMARNAT-2002: Protección Ambiental-Fabricación de Cemento Hidráulico-Niveles Máximos de Emisión a la Atmósfera	Aplicable a las fuentes fijas dedicadas a la fabricación de cemento hidráulico, y que utilicen combustibles convencionales o sus mezclas con otros materiales o residuos que son combustibles
NOM-043-SEMARNAT-1993: Niveles Máximos Permisibles de Emisión a la Atmósfera de Partículas Sólidas Provenientes de Fuentes Fijas	Aplicable a las fuentes fijas que emitan partículas sólidas a la atmósfera, con la excepción de las que se rigen por normas oficiales mexicanas específicas
NOM-085-SEMARNAT-1994: Fuentes Fijas que Utilizan Combustibles Fósiles, Líquidos o Gaseosos o Cualquiera de sus Combinaciones. Niveles Máximos Permisibles de Emisión a la Atmósfera de Humos, Partículas Suspendidas Totales, Bióxido de Azufre y Óxidos de Nitrógeno. Requisitos y Condiciones para la Operación de los Equipos de Calentamiento o Indirecto por Combustión, así como Niveles Máximos Permisibles de Emisión de Bióxido de Azufre en los Equipos de Calentamiento Directo por Combustión	Aplicable para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles, líquidos y gaseosos o cualquiera de sus combinaciones para el uso de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los equipos de generación eléctrica que utilizan la tecnología de ciclo combinado
NOM-097-SEMARNAT-1995: Límites Máximos Permisibles de Emisión a la Atmósfera de Material Particulado y Óxidos de Nitrógeno en los Procesos de Fabricación de Vidrio en el País	Se aplica a la industria vidriera que cuente con hornos de fundición de vidrio con capacidad superior a 5 t/día
NOM-105-SEMARNAT-1996: Niveles Máximos Permisibles de Emisiones a la Atmósfera de Partículas Sólidas Totales y Compuestos de Azufre Reducido Total Provenientes de los Procesos de Recuperación de Químicos de las Plantas de Fabricación de Celulosa	Se aplica a los procesos de recuperación de químicos en la fabricación de celulosa

Figura 2.2 Límites de concentración recomendados por la OMS para $PM_{2.5}$, y comparación con la normatividad de México, Estados Unidos (NAAQS-USEPA), California (CARB-US) y la Unión Europea (UE)



Fuente [49, 50, 51, 52 y 53]

NORMA	APLICACIÓN
Emisiones de fuentes móviles	
NOM-O42-SEMARNAT-2003: Que Establece los Límites Máximos Permisibles de Emisión de Hidrocarburos Totales o No Metano, Monóxido de Carbono, Óxidos de Nitrógeno y Partículas provenientes del Escape de los Vehículos Automotores Nuevos Cuyo Peso Bruto Vehicular no Exceda los 3,857 Kilogramos, que Usan Gasolina, Gas Licuado de Petróleo, Gas Natural y Diésel, así como de las Emisiones de Hidrocarburos Evaporativos Provenientes del Sistema de Combustible de Dichos Vehículos	Se aplica tanto a los vehículos nuevos fabricados en México, como a los fabricados en otros países que se importen definitivamente en el territorio nacional
NOM-O44-SEMARNAT-2006: Que Establece los Límites Máximos Permisibles de Emisión de Hidrocarburos Totales, Hidrocarburos No Metano, Monóxido de Carbono, Óxidos de Nitrógeno, Partículas y Opacidad de Humo Provenientes del Escape de Motores Nuevos que Usan Diésel como Combustible y que se Utilizarán para la propulsión de Vehículos Automotores Nuevos con Peso Bruto Vehicular mayor a los 3,857 Kilogramos, así como para Unidades Nuevas con Peso Bruto Vehicular Mayor a 3.857 Kilogramos Equipadas con este Tipo de Motores	Es aplicable para los fabricantes, importadores y ensambladores de los motores nuevos que usan diésel como combustible

Fuente [48]

los estándares internacionales y de otros países que se mencionan en las siguientes secciones se muestran en las gráficas de la figura 2.2.

Normatividad de otras regiones o países

La Organización Mundial de la Salud ha publicado unas guías de la calidad del aire, donde establece un valor de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como límite para la concentración promedio de 24 horas, y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como límite para la concentración promedio anual [43]. Otros estándares que se presentan en esta sección son los dados por la EPA, la cual ha establecido para el estándar de 24 horas un valor de 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como límite para la concentración promedio anual [44]. Por otro lado, la Comunidad Europea también ha desarrollado su normatividad para regular la concentración de PM_{2.5}, y ha establecido el valor máximo permisible de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la concentración promedio anual, y de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio anual de tres años como un indicador de exposición para la población [45].

De acuerdo con la figura 2.2, se observa que el límite para la concentración promedio de 24 horas en México es casi el doble del establecido por la EPA, y ese valor se agranda más si se compara con los límites establecidos por la OMS y la Unión

Europea. Para el caso de la concentración anual, las diferencias son mucho menores, y el valor más alto es el establecido por la Unión Europea.

2.4 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. Borja-Aburto V. H., Rosales-Castillo J. A., Torres-Meza V. M., Corey G. y Olaíz-Fernández G., "Evaluation of Health Effects of Pollution". Ancillary Benefits and Costs of Greenhouse Gas Mitigation. Proceedings of an IPCC Co-Sponsored Workshop. 27-29 March, 2000, Washington, D.C., OECD Publication, pp. 275-341.
3. <http://www.co.mendocino.ca.us/aqmd?AQhistory.htm>. Consultado 19 de septiembre, 2010.
4. Pope III, C. A. y Dockery, D. W. (2006), "Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect". J. Air & Waste Manage. Assoc. 56:709-742. 2006 Critical Review.
5. Organización Mundial de la Salud (2005), "Guías de Calidad del Aire de la OMS Relativas al Material Particulado, el Ozono, el Dióxido de Nitrógeno y el Dióxido de Azufre". Actualización Mundial 2005. Resumen de Evaluación de los Riesgos. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02.
6. World Health Organization Europe (2005), "Air Quality Guidelines. Global Update 2005. Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide".
7. Dockery, D. W., Cunningham, J., Damokosh, A. I., Neas, L. M., Spengler, J. D., Koutrakis, P., Ware, J. H., Raizenne, M. y Speizer, F. E. (1996), "Health Effects of Acid Aerosol on North American Children: Respiratory Symptoms". Environmental Health Perspectives, Vol. 104, No. 5, pp. 500-505.
8. Spengler, J. D., Koutrakis, P., Dockery, D. W., Raizenne, M. y Speizer, F. E. (1996), "Health Effects of Acid Aerosol on North American Children: Air Pollution Exposures". Environmental Health Perspectives, Vol. 104, No. 5, pp. 492-499.
9. Raizenne, M., Neas, L. M., Damokosh, A. I., Dockery, D. W., Spengler, J. D., Koutrakis, P., Ware, J. H. y Speizer, F. E. (1996), "Health Effects of Acid Aerosol on North American Children: Pulmonary Function". Environmental Health Perspectives, Vol. 104, No. 5, pp. 506-514.

10. von Klot, S., Wölke, G., Tuch, T., Heinrich, J., Dockery, D. W., Schwartz, J., Kreyling, W. G., Wichmann, H. E. y Peters, A., (2002), "Increased Asthma Medication Use in Association with Ambient Fine and Ultrafine Particles". *Eur. Respir J*, 20:691-702.
11. Peters, A., Dockery, D. W., Heinrich, J. y Wichmann, H. E. (1997), "Short-term Effects of Particulate Air Pollution on Respiratory Morbidity in Asthmatic Children". *Eur. Respir J*, 10:872-879.
12. Rich, D. Q., Schwartz, J., Mittleman, M.A., Link, M., Luttmann-Gibson, H., Catalano, P. J., Speizer, F. E. y Dockery, D. W. (2005), "Association of Short-term Ambient Air Pollution Concentrations and Ventricular Arrhythmias". *Am J Epidemiol*, 161:1123-1132.
13. Zanobetti, A., Franklin, M., Koutrakis, P. y Schwartz, J. (2009), "Fine Particulate Air Pollution and Its Components in Association with Cause-Specific Emergency Admissions". *Environmental Health*, 8:58.
14. Laden, F., Neas, L. M., Dockery, D. W. y Schwartz, J., (2000), "Association of Fine particulate Matter from Different Sources with Daily Mortality in Six U.S. Cities". *Environmental Health Perspectives*, Vol. 108, 10:941-947.
15. Laden, F., Schwartz, J., Speizer, F. E. y Dockery, D. W. (2006), "Reduction in Fine Particulate Air Pollution and Mortality". *Am J Respir Crit Care Med*, Vol. 173, pp 667-672.
16. Peters, A., Dockery, D. W., Muller, J. E. y Mittleman, M. A. (2001), "Increased Particulate Air Pollution and the Triggering of Myocardial Infarction". *Circulation*, 103:2810-2815.
17. Goodman, P. G., Dockery, D.W. y Clancy, L. (2004), "Cause-Specific Mortality and the Extended Effects of Particulate Pollution and Temperature Exposure". *Environmental Health Perspectives*, Vol. 112, 2:179-185.
18. INE-SEMARNAT (2003), "Partículas Suspendidas, Aeropartículas o Aerosoles ¿Hacen daño a la salud? ¿Qué Hacer?". *Gaceta Ecológica*, Oct.-Dic., No. 069, pp. 29-44.
19. Bell, M. L., Dominici, F., Ebisu, K., Zeger S. L., y Samet J. M., (2007), "Spatial and Temporal Variation in PM_{2.5} Chemical Composition in the United States for Health Effects Studies". *Environmental Health Perspectives*, Vol. 115, 7:989-995.
20. Pope III, C. A. (2000), "Epidemiology of Fine Particulate Air Pollution and Human Health: Biologic Mechanisms and Who's at Risk". *Environmental Health Perspectives*, Vol. 108, 7:989-995.

21. Hernández-Cadena, L., Barraza-Villareal, A., Ramírez-Aguilar, M., Moreno-Macías H., Millar, P., Carbajal-Arroyo, L. A. Romieu, I., (2005), "Morbilidad Infantil por Causas Respiratorias y su Relación con la Contaminación Atmosférica en Ciudad Juárez, Chihuahua, México". *Salud Pública de México*, Vol. 49, No. 1, pp. 27-36.
22. Ramírez-Sánchez, H. U., Andrade-García, M. D. González-Castañeda, M. E., Celis-de la Rosa A. de J., (2005), "Contaminantes Atmosféricos y su Correlación con Infecciones Agudas de las Vías Respiratorias en Niños de Guadalajara, Jalisco". *Salud Pública de México*, Vol. 49, No. 1, pp. 27-36.
23. Rojas-Martinez R., Perez-Padilla, Olaiz-Fernandez G., Mendoza-Alvarado L., Moreno-Macias H., Fortoul T., McDonnell W., Loomis D. y Romieu I. (2007), "Lung Function Growth in Children with Long-Term Exposure to Air Pollutants in Mexico City". *Am J Respir Crit Care Med*, Vol. 176, pp 377-384.
24. Hernández-Cadena, L., Téllez-Rojo, M. Ma., Sanín-Aguirre, L. H., Lacasaña-Navarro M., Campos, A., y Romieu, I., (2000), "Relación entre Consultas a Urgencias por Enfermedad Respiratoria y Contaminación Atmosférica en Ciudad Juárez, Chihuahua". *Salud Pública de México*, Vol. 42, No. 4, pp. 288-297.
25. Riojas-Rodriguez, H., Holguin, F., González-Hermosillo, A. y Romieu, I. (2006), "Uso de la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca como Marcador de los Efectos Cardiovasculares Asociados con la Contaminación del Aire". *Salud Pública de México*, Vol. 48, No. 4, pp. 348-357.
26. Rosales-Castillo, J. A., Torres-Meza, V. M., Olaiz-Fernández, G., y Borja-Aburto V. H. (2001), "Los Efectos Agudos de la Contaminación del Aire en la Salud de la Población: Evidencias de Estudios Epidemiológicos". *Salud Pública de México*, Vol. 43, No. 6, pp. 544-555.
27. Molina, L. T. y Molina M. J. (Coordinadores), (2005), "La Calidad del Aire en la Megaciudad de México, Un enfoque Integral". Fondo de Cultura Económica.
28. Borja-Aburto V. H., Castillejos M., Gold D. R., Bierzwinski S. y Loomis D., (1998), "Mortality and Ambient Fine Particles in Southwest Mexico City, 1993-1995". *Environmental Health Perspectives*, Vol. 106, No. 12, pp. 849-855.
29. Osornio-Vargas A., Bonner J. C., Alfaro-Moreno E., Martínez L., García-Cuellar C., Ponce-de-León Rosales S., Miranda J., y Rosas I., (2003), "Proinflammatory and Cytotoxic Effects of Mexico City Air Pollution Particulate Matter in Vitro are Dependent on Particle Size and Composition". *Environmental Health Perspectives*, Vol. 111, No. 10, pp. 1289-1296.

30. Barraza-Villareal A., Sunyer J., Hernández-Cadena L., Escamilla-Nuñez M. C., Sienna-Monge J. J., Ramírez-Aguilar M., Cortez-Lugo M., Holguin F., Díaz-Sánchez D., Carin O, A. y Romieu I., (2008), "Air Pollution, Airway Inflammation, and Lung Function in a Cohort Study of Mexico City Schoolchildren". *Environmental Health Perspectives*, Vol. 116, No. 6, pp. 832-838.
31. Escamilla-Nuñez M. C., Barraza-Villareal, A., Hernandez-Cadena L., Moreno-Macias H., Ramirez-Aguilar M., Sienna-Monge J. J., Cortez-Lugo M., Texcalac, J. L., del Río-Navarro B., Romieu I., (2008), "Traffic-related Air Pollution and Respiratory Symptoms Among Asthmatic Children, Resident in Mexico City: the EVA Cohort Study". *Respiratory Research*, 9:74
32. O'Neill M. S., Loomis D., Borja Aburto V. H. Gold D., Hertz-Picciotto I., Castillejos M., (2004), "Do associations Between Airborne Particles and Daily Mortality in Mexico City Differ by Measurement Method, Region or Modeling Strategy?". *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 14, 429-439.
33. Sierra-Vargas M. P., Guzman-Grenfell A. M., Blanco-Jimenez S., Sepulveda-Sanchez J. D., Bernabe-Cabanillas R. M., Cardenas-Gonzalez B., Ceballos G., y Hicks J. J., (2009), "Airborne Particulate Matter PM_{2.5} from Mexico City Affects the generation of Reactive Oxygen Species by Blood Neutrophils from Asthmatics: an in Vitro Approach". *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 4:17.
34. Holguin F., Flores S., Ross Z., Cortez M., Molina M., Molina L., Rincon C., Jerret M., Berhane K., Granados A., y Romieu I., (2007), "Traffic-related Exposures, Airway Function, Inflammation, and Respiratory Symptoms in Children", *Am J Respir Crit Care Med.*, Vol 176, pp. 1236-1242.
35. Environmental Protection Agency, (2004), "Air Quality Criteria for Particulate Matter". EPA/600/P-99/002aF.
36. Environmental Protection Agency (2009), "Integrated Science Assessment for Particulate Matter". EPA/600/R-08/139F, December, 2009.
37. Comisión de Cooperación Ambiental, "Deposición ácida". Consultado 10 de noviembre, 2010. http://www.cec.org/Storage/35/2619_SOE_AcidDep_es.pdf
38. Environmental Protection Agency. Consultado 13 de noviembre, 2010. http://www.epa.gov/acidrain/spanish/effects/surface_water.html
39. Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. Consultado 14 de noviembre, 2010. <http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnparticulas.htm>

40. Environmental Protection Agency. Consultado 14 de noviembre, 2010.
<http://www.epa.gov/acidrain/spanish/effects/visibility.html>
41. Chin M., Khan R., Remer L., Yu H., Rind D., Feingold G., Quinn P., Schwartz S., Streets D., Halthore, R y DeCola P., (2008), "Aerosol Properties and Their Impacts on Climate". Synthesis and Assessment Product 2.3. U.S. Climate Change Science Program.
42. IPCC (2001), "Tercer Informe de Evaluación, Cambio Climático 2001, La Base Científica". Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
43. WHO (2006), "WHO Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide". Global update 2005. Summary of Risk Assessment.
44. Environmental Protection Agency (2006), "40 CFR Part 50, National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter; Final Rule". Part II. October, 2006.
45. European Commission Environment. Consultado 15 de Noviembre, 2010.
<http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>
46. Bond, T. C., Streets, D. G., Yarber, K. F., Nelson, S. M., Woo, J.-H., y Klimont, Z.: A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion, *J. Geophys. Res.*, 109, D14203, doi:10.1029/2003JD003697, 2004.
47. Jiang, M., Marr, L. C., Dunlea, E. J., Herndon, S. C., Jayne, J. T., Kolb, C. E., Knighton, W. B., Rogers, T. M., Zavala, M., Molina, L. T. y Molina, M. J. (2005). Vehicle fleet emissions of black carbon, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other pollutants measured by a mobile laboratory in Mexico City. *Atmos. Chem. Phys.* (5), 3377–3387.
48. NOM- Normas Oficiales Mexicanas. Disponibles en el sitio web: <http://www.semarnat.gob.mx/leyesnормas/Pages/nomsxmateria.aspx>
49. NOM-025-SSA1-1993 (DOF, 2005)
50. NAAQS-USEPA. National Ambient Air Quality Standards. <http://www.epa.gov/air/criteria.html>
51. CARB-US. California Environmental Protection Agency. <http://www.arb.ca.gov/research/aaqs/aaqs2.pdf>
52. UE. Unión Europea. <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>
53. OMS —Organización Mundial de la Salud— http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf