

A scanning electron micrograph (SEM) showing a dense network of fine, fibrous particles and larger, spherical particles. The fibers are thin and elongated, while the spherical particles are more rounded and textured. The overall appearance is that of a complex, interconnected particulate matter structure.

**Guía metodológica para la
estimación de emisiones de PM_{2.5}**

Guía metodológica para la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Instituto Nacional de Ecología

Revisores (en orden alfabético)

Dr. Gerardo Mejía Velázquez

Director de Cambio Climático, Calidad de Aire y RETC en la Secretaría de Desarrollo Sustentable de Nuevo León.

Dr. Víctor Hugo Páramo Figueroa

Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire de la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.

Revisión editorial

Ana María Sánchez Mora

Diseño y formación

LDC Maya Campos Farfán

Foto de portada: *Dra. Luisa Manzanares Papayanopoulos*

D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Blvd. Adolfo Ruiz Cortines 4209. Col. Jardines de la Montaña
C.P. 14120. Delegación Tlalpan, México, D.F.
www.semarnat.gob.mx

Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNA)
Periférico Sur 5000. Col. Insurgentes Cuicuilco
C.P. 04530. Delegación Coyoacán, México, D.F.
www.ine.gob.mx

Primera edición 2011

ISBN: 978-607-8246-52-6

Impreso en México.

Índice

Acrónimos y simbología	07
Lista de participantes	09
Introducción	11
Qué son, cómo son y cómo se originan las partículas	13
1.1 Clasificación de las partículas	13
Partículas según su origen	13
Partículas según su tamaño	14
Partículas según su proceso de formación y tamaño	15
Partículas filtrables y condensables	17
1.2 Características de las partículas	18
Formas de las partículas	18
Composición química de las partículas	18
Permanencia de las partículas en la atmósfera	22
Número de partículas ambientales	24
1.3 Fuentes emisoras de partículas	25
Fuentes antrópicas	26
Fuentes naturales	28
1.4 Referencias	31
IMPORTANCIA DE LAS PARTÍCULAS PM _{2.5}	33
2.1 IMPACTOS EN LA SALUD	34
Mortalidad y morbilidad	35
Estudios realizados en México	37
2.2 IMPACTOS EN EL MEDIOAMBIENTE	38
Procesos de remoción de partículas	38
Reducción de la visibilidad	42
Impactos relacionados con el cambio climático	43

2.3	NORMAS Y ESTÁNDARES APLICABLES	45
	Normas y estándares que limitan las emisiones	45
	Normatividad que establece el valor permisible para la concentración de $PM_{2.5}$ en el aire ambiente	45
2.4	REFERENCIAS	48
MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE $PM_{2.5}$		53
3.1	MEDICIÓN DIRECTA	54
	Muestreo en fuente	54
3.2	ESTIMACIÓN INDIRECTA	60
	Factores de emisión	60
	Razón $PM_{2.5}/PM_{10}$	78
	Herramientas computacionales para la estimación de emisiones (modelos)	80
3.3	ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE CARBONO NEGRO (BC, BLACK CARBON) A PARTIR DE LAS $PM_{2.5}$	84
3.4	RECOMENDACIONES GENERALES SOBRE EL USO DE LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN	86
3.5	REFERENCIAS	87
RECOMENDACIONES FINALES		91
4.1.	EVALUACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES	91
	Control y aseguramiento de la calidad	91
	Durante el proceso de estimación de las emisiones de $PM_{2.5}$	93
	Incertidumbre	95
4.2	MANEJO DE INFORMACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	98
	Uso de cuadros	99
	Uso de figuras	99
4.3	REFERENCIAS	101
GLOSARIO		103

Figuras

Figura 1.1	Ejemplo de proceso químico de formación de partículas secundarias	14
Figura 1.2	Diferencia en los tamaños de las partículas	15
Figura 1.3	Clasificación de partículas por su proceso de formación y tamaño	16
Figura 1.4	Ejemplos de formas de partículas ambientales, colectadas en un filtro	18
Figura 1.5	Composición típica de las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$	22
Figura 1.6	Contribución de emisiones contaminantes por categoría de fuentes en México, 2005	25
Figura 1.7	Contribución de emisiones de $PM_{2.5}$ por categoría de fuentes fijas en México (INEM, 2005)	26
Figura 1.8	Contribución de emisiones de $PM_{2.5}$ por categoría de fuentes de área en México (INEM, 2005)	27
Figura 1.9	Contribución de emisiones de $PM_{2.5}$ por categoría de fuentes móviles que circulan por carretera en México (INEM, 2005)	28
Figura 1.10	Contribución de emisiones de $PM_{2.5}$ por categoría de fuentes móviles que no circulan por carretera en México (INEM, 2005)	28
Figura 2.1	Esquema de la deposición de partículas suspendidas	39
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)	46
Figura 3.1	Proceso general para la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$	53
Figura 3.2	Diagrama del tren de muestreo del método isocinético	56
Figura 3.3	Guía práctica para la ejecución del modelo NON-ROAD-México (NRM)	83
Figura 4.1	Ejemplo de un gráfico mal presentado	99
Figura 4.2	Ejemplo de una gráfica que utiliza percentiles	100

Cuadros

Cuadro 1.1 Principales características de las partículas ultrafinas, finas y gruesas	17
Cuadro 1.2 Componentes mayoritarios y minoritarios de las partículas suspendidas	19
Cuadro 1.3 Principales características de la composición de las $PM_{2.5}$ y PM_{10}	23
Cuadro 1.4 Principales características de las partículas ambientales que influyen en su permanencia en la atmósfera	24
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	24
Cuadro 1.6 Principales fuentes de emisión de las partículas ultrafinas, finas y gruesas	29
Cuadro 1.7 Principales fuentes de emisión de la fracción de partículas	30
Cuadro 2.1 Penetrabilidad de las partículas en el tracto respiratorio según su tamaño	33
Cuadro 2.2 Efectos de la composición de las $PM_{2.5}$ y los ingresos hospitalarios en 26 comunidades de Estados Unidos	37
Cuadro 2.3 Efectos de las partículas y otros contaminantes sobre los ecosistemas	38
Cuadro 2.4 Valores de forzamiento radiativo para algunos aerosoles	44
Cuadro 2.5 Normas mexicanas que establecen los niveles máximos de emisión de partículas a la atmósfera para diferentes tipos de fuentes	46
Cuadro 3.1 Fuentes potenciales de emisión de $PM_{2.5}$	62
Cuadro 3.2 Metodologías de estimación de $PM_{2.5}$ a partir de las diferentes fuentes de emisión	64
Cuadro 3.3 Estimación de emisiones de $PM_{2.5}$ en el Inventario Nacional de Emisiones de México, año 2005.	65
Cuadro 3.4 Ejemplos de factores de emisión del AP-42 para combustión	66
Cuadro 3.5 Distribución del porcentaje acumulado de la masa por tamaño de partícula y factores de emisión para las calderas que queman combustóleo	69
Cuadro 3.6 Ejemplo de los factores de emisión de las partículas condensables	70
Cuadro 3.7 Algunos factores de emisión y datos de actividad usados en el INEM 1999	76
Cuadro 3.8 Fuentes de emisión y relación $PM_{2.5}/PM_{10}$	78
Cuadro 3.9 Algunas relaciones $PM_{2.5}/PM_{10}$ generadas por la CARB	79
Cuadro 3.10 Emisiones de carbono negro a partir de correlaciones con $PM_{2.5}$	85

Acrónimos y simbología

AEI	Indicador de exposición promedio	Mg	Magnesio
Al	Aluminio	Mn	Manganeso
As	Arsénico	MOBILE	Modelo para el cálculo de factores de emisión de vehículos automotores de la EPA
Br	Bromo	MOVES	Motor Vehicle Emission Simulator (simulador de emisiones vehiculares)
Ca	Calcio	Na⁺	Ion sodio
CaCO₃	Carbonato de calcio	NaCl	Cloruro de sodio
CARB	California Air Resources Board (Consejo de Recursos Atmosféricos de California)	NH₃	Amoníaco
CaSO₄	Sulfato de calcio	NH₄NO₃	Nitrato de amonio
Cd	Cadmio	(NH₄)₂SO₄	Sulfato de amonio
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal	Ni	Níquel
COV	Compuestos orgánicos volátiles	NO₃⁻	Nitrato
CT	Central termoelectrónica	NO_x	Óxidos de nitrógeno
Cu	Cobre	Pb	Plomo
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)	PCT	Partículas condensables totales
FAO	Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación)	PEMEX	Petróleos Mexicanos
Fe	Hierro	PM₁₀	Partículas de diámetro aerodinámico menor a 10 micrómetros
FIRE	Factor Information Retrieval System (Sistema de Información de Factores de Emisión de la EPA)	PM_{2.5}	Partículas de diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros

H₂SO₄	Ácido sulfúrico	PST	Partículas suspendidas totales
HCl	Ácido clorhídrico	SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
Hg	Mercurio	SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
HNO₃	Ácido nítrico	Si	Sílice
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía	SO₂	Dióxido de azufre
INEM	Inventario Nacional de Emisiones	SO₄²⁻	Sulfato
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Panel Intergubernamental del Cambio Climático)	Ti	Titanio
IVE	International Vehicle Emission Model (Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares)	V	Vanadio
K	Potasio	ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
µm	Micrómetros o micras	Zn	Zinc

Lista de participantes

Coordinación del documento

Verónica Garibay Bravo. Consultora en medio ambiente.

Ma. Tania López Villegas. Subdirectora de Estudios Estratégicos de la Calidad del Aire, Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire, DGICUR-INE.

Elaboración del documento

Luisa Manzanares Papayanopoulos. Profesora investigadora del Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Instituto Politécnico Nacional.

Georgina Echániz Pellicer. Centro de Derecho y Educación Ambiental.

Ma. Tania López Villegas. Subdirectora de Estudios Estratégicos de la Calidad del Aire, Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire, DGICUR-INE.

Ingrid K. Pérez Rivas. Jefa del Departamento de Estudios sobre Emisiones por Fuentes Estacionarias, Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire, DGICUR-INE.

Verónica Garibay Bravo. Consultora en medio ambiente.

Introducción

La contaminación atmosférica es vista en México y en muchas partes del mundo como un problema local, ya que se manifiesta principalmente en las grandes ciudades. Sin embargo, conforme se ha ido investigando más profundamente en el tema se han evidenciado los efectos de la contaminación del aire, que además de su impacto local tienen un efecto regional y global. Manifestaciones de sequías prolongadas, episodios de inundaciones derivadas de lluvias intensas y nevadas severas son algunos ejemplos de las alteraciones que está sufriendo el clima de nuestro planeta, derivadas de la presencia de los contaminantes atmosféricos. Dentro de los contaminantes del aire, las partículas ambientales han ido adquiriendo importancia, principalmente desde dos puntos de vista: su afectación a la salud humana y su contribución al cambio climático. Para poder contrarrestar estos efectos adversos es necesario cuantificar la magnitud de las emisiones de este contaminante, y es por ello el interés en la elaboración de la presente guía.

Esta guía de estimación de emisiones de partículas con diámetro aerodinámico menor a $2.5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) es parte del esfuerzo continuo que realiza la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a través del Instituto Nacional de Ecología (INE), en materia de desarrollo de capacidades para la elaboración de inventarios de emisiones. El objetivo es dar una base de conocimiento que esté al alcance de todos los actores involucrados en la elaboración de inventarios de los tres niveles de gobierno, así como de la academia y de los consultores privados e industriales.

Este esfuerzo de crear una base de conocimiento común a nivel nacional comenzó con la elaboración del primer Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM) para el año 1999, el cual contó con el apoyo de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) y la Asociación de Gobernadores del Oeste (WGA, por sus siglas en inglés). El INE y la Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental de la SEMARNAT llevaron a cabo el Programa de Inventarios de Emisiones para México, Manuales y Reportes. Con este proyecto se crearon las primeras herramientas básicas para la planeación, el desarrollo y la

actualización de los inventarios de emisiones contaminantes a la atmósfera, a través de ocho manuales que contienen metodologías generales para su realización.

Actualmente estos manuales están siendo renovados, y se han publicado ya nuevas versiones de esos primeros manuales, y algunos otros están en proceso. Con la publicación de estas guías se quiere incluir las lecciones aprendidas a lo largo de todo el proceso que se inició con la realización del primer inventario, así como homologar algunos criterios para estandarizar los métodos y poder realizar comparaciones entre los inventarios generados en diferentes regiones del país, para integrar su contenido en el INEM.

Con esta revisión se han integrado varios de los ocho manuales originales, tanto en el documento intitulado *Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones*, publicado en el año 2005 y que reemplaza a los volúmenes I, II, III y VIII, como en la *Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas*, publicada en el año 2009 y que reemplaza el volumen VI, así como la *Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas*, que será publicada pronto y reemplazará al volumen IV.

La *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2.5}* es la cuarta publicación de esta nueva serie, y atiende los temas a los que originalmente se refería un volumen X (ya que adicionalmente surgieron dos volúmenes más, posteriores a los primeros ocho manuales, que permanecieron como borradores preliminares y no fueron traducidos al español).

La guía se divide en cuatro capítulos principales. El primero es una introducción que habla del origen y las características de las partículas, así como de sus principales fuentes de emisión. El segundo capítulo se refiere a la importancia de conocer la regulación respecto a las PM_{2.5} y sus efectos sobre la salud humana y el medioambiente a escala local y global. El tercer capítulo trata de los métodos de estimación de las emisiones, enfatizando las diferencias con respecto a las fuentes de emisión a las cuales se aplica cada método, de manera que sirva como referencia para quienes estén por iniciar la elaboración de un inventario o una estimación de PM_{2.5}. Finalmente, el cuarto capítulo expone algunas recomendaciones adicionales para mejorar la calidad y la confiabilidad de los resultados de las estimaciones de PM_{2.5}.

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].

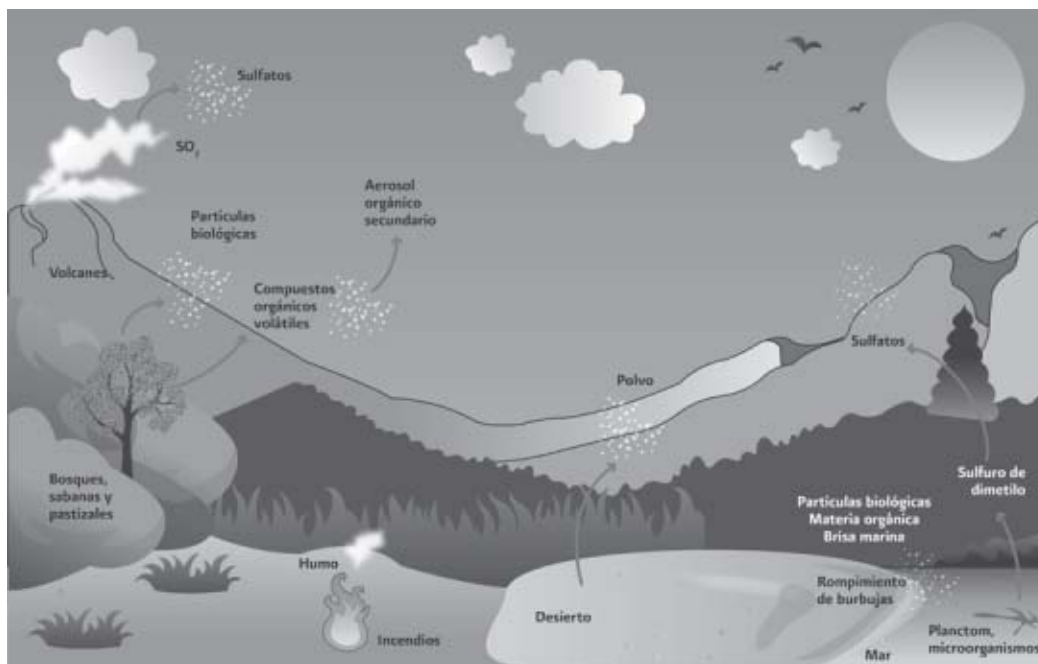
Partículas según su tamaño

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.

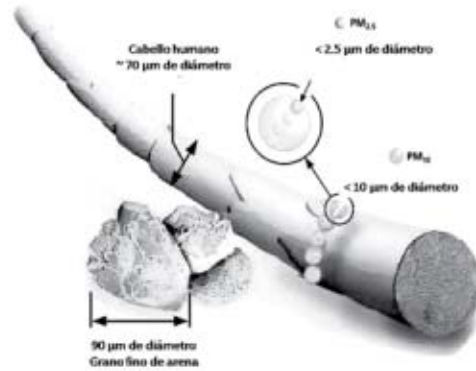
Originalmente, el indicador de la calidad del aire referente a las partículas era solo para las partículas suspendidas totales (PST), las cuales comprenden un rango de tamaño entre 0.005 y 100 micrómetros o micras (μm) de diámetro aerodinámico [6,7]; sin embargo, la mayoría de las partículas presentes 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

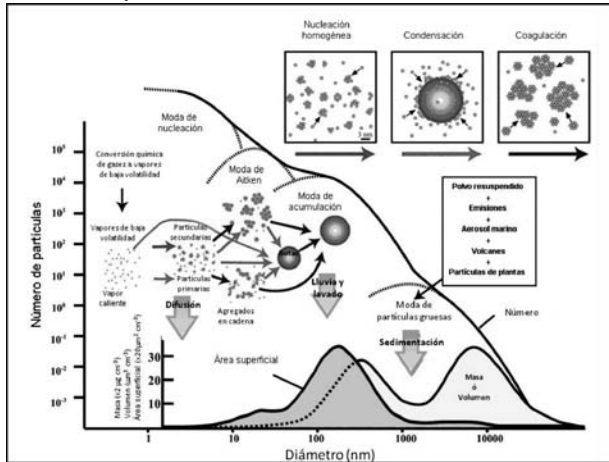
El diámetro aerodinámico está en función de los procesos de formación de las partículas; frecuentemente se utiliza una clasificación que constituye una combinación de los procesos de formación y del tamaño de las partículas, y las distingue en diversas "modas" (ver figura 1.3) que se conocen como moda 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 coagulación³, o 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

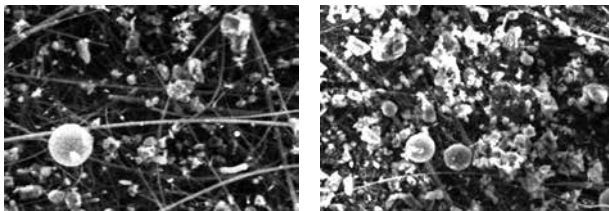
Las partículas suspendidas tienen características únicas entre los contaminantes atmosféricos. Mientras que los contaminantes en fase gaseosa, como el dióxido de azufre, el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno, son compuestos químicos bien definidos, las partículas varían en cuanto a su forma, 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:

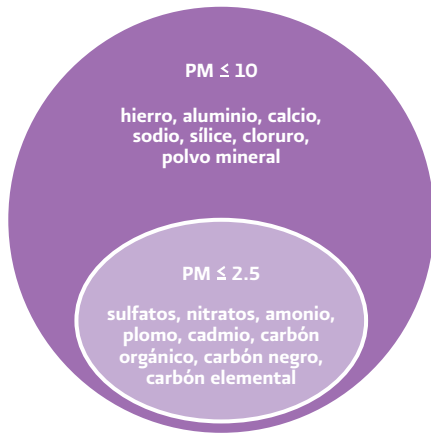
- Elementos traza. Ejemplos de estos son los metales, como plomo, cadmio, mercurio, níquel, cromo, zinc y manganeso, los cuales pueden ser emitidos por procesos metalúrgicos, sistemas de combustión, etc. Las concentraciones de los elementos traza son muy pequeñas, tanto que su detección es a menudo una 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 (≤ 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 HNO₃, HCl y SO₂ con partículas gruesas • Óxidos de elementos de la corteza terrestre (Si, Al, Ti, Fe) • CaCO₃, CaSO₄, 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 SO₂ 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 PM₁₀ 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 $10 \mu m$ en partículas de 1, 0.1 y $0.01 \mu m$ en números relativos y área superficial relativa, podemos observar, como se muestra en el cuadro 1.5, que mil millones de partículas de $0.01 \mu m$ equivalen al volumen y la masa de una partícula de $10 \mu m$, y que mil millones de partículas de $0.01 \mu m$ 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.

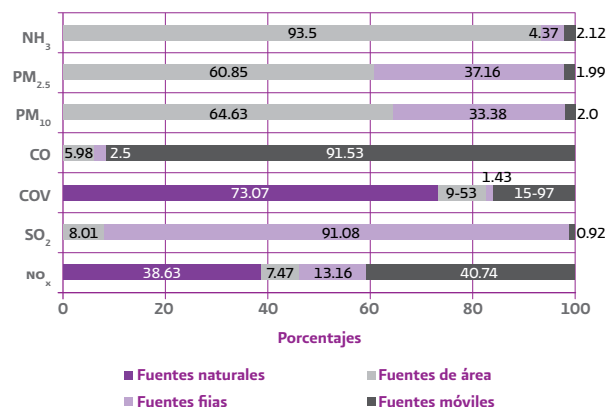
Diversos estudios han mostrado, por ejemplo, que los vehículos de diésel emiten poca masa de partículas, pero hay una emisión alta de partículas ultrafinas, las cuales, como se ha mencionado, pueden llegar hasta los alvéolos, y además en este rango de tamaño se concentran compuestos cancerígenos. Por 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.

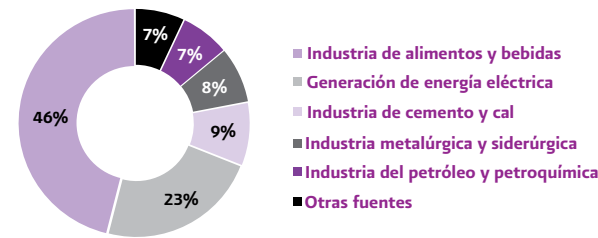
Las fuentes antrópicas, a su vez, se dividen en fuentes fijas o estacionarias, fuentes de área y fuentes móviles, mientras que las naturales se dividen en biogénicas y geogénicas. Esta clasificación sirve de base para compilar de una manera ordenada la información sobre las emisiones que se derivan de 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 humanas, 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.

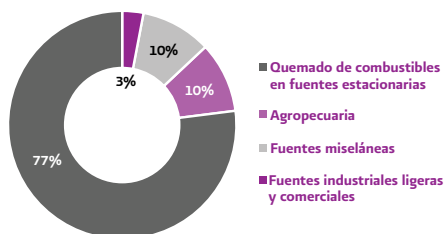
⁶ El clinker se forma tras calcinar caliza y arcilla a una temperatura que está entre 1350 y 1450 °C. Estos productos se muelen para fabricar el cemento Portland.

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

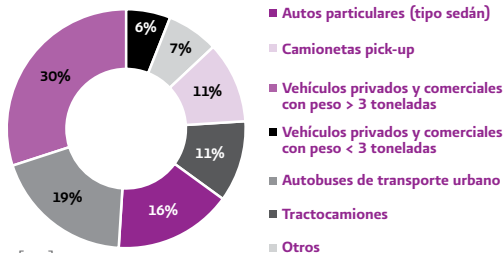
Las fuentes de área incluyen aquellas fuentes que son demasiado numerosas y dispersa, pero que en conjunto son emisoras significativas de contaminantes. Ejemplo de ellas son las gasolineras, tintorerías, actividades de construcción, quemas agrícolas, resuspensión de polvos de caminos, entre otras.

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

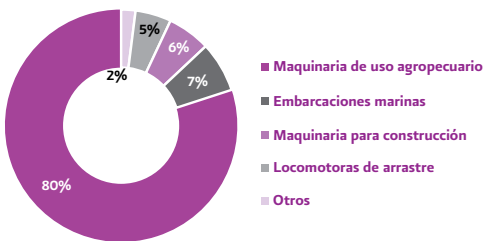
Las fuentes móviles que se incluyen en esta categoría son todas las fuentes motorizadas con autorización para circular por caminos públicos, como motocicletas, vehículos de pasajeros, camiones y autobuses, así como aquellas que no circulan por carretera, como maquinaria de uso agrícola, locomotoras, 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/airsience/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".

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.

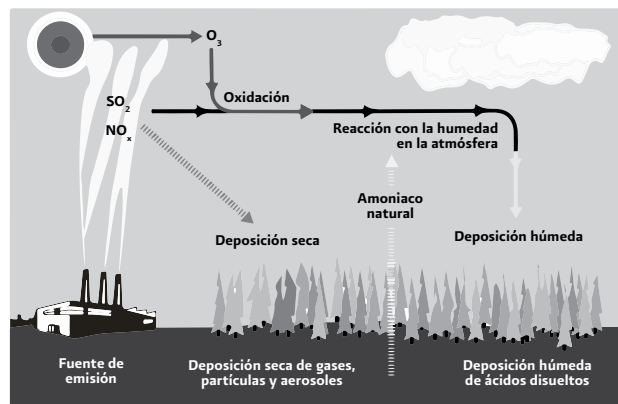
Como se muestra en la figura 2.1, la deposición puede ser húmeda o seca. La deposición seca es un proceso complejo muy poco caracterizado y que parece ser controlado primordialmente por las siguientes variables: estabilidad atmosférica, rugosidad de las superficies y diámetro de la partícula. Este proceso 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 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 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.

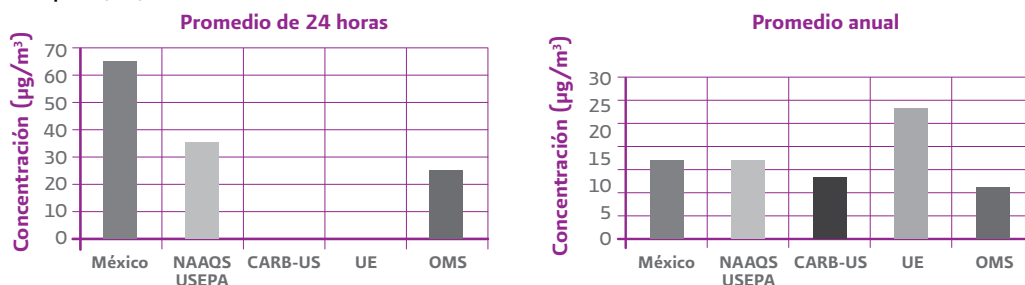
Normas oficiales mexicanas

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	
<p>NOM-042-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</p>	<p>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</p>
<p>NOM-044-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</p>	<p>Es aplicable para los fabricantes, importadores y ensambladores de los motores nuevos que usan diésel como combustible</p>

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 µg/m³ como límite para la concentración promedio de 24 horas, y 10 µg/m³ 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 µg/m³, y 15 µg/m³ 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 µg/m³ para la concentración promedio anual, y de 20 µg/m³ 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>

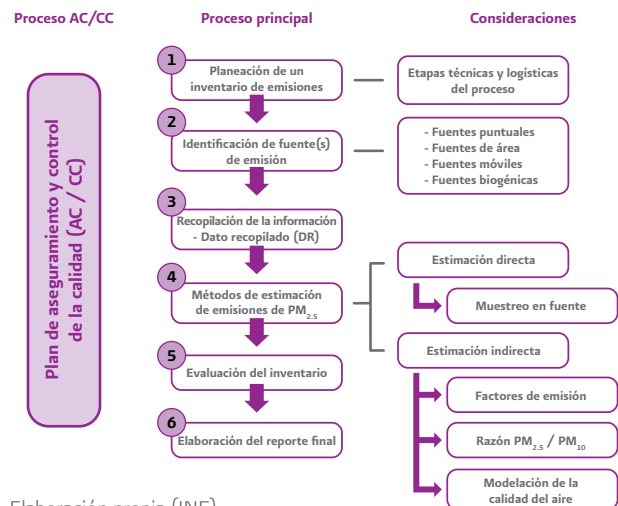
40. Environmental Protection Agency. Consultado 14 de noviembre, 2010.
<http://www.epa.gov/acidrain/spanish/effects/visibility.html>
41. Chin M., Khan R., Remer L., Yu H., Rind D., Feingold G., Quinn P., Schwartz S., Streets D., Halthore, R y DeCola P., (2008), "Aerosol Properties and Their Impacts on 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

Métodos de estimación de emisiones de $PM_{2.5}$

Para llevar a cabo la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$ se requiere de un riguroso proceso de trabajo que se encuentra integrado por las siguientes etapas: planeación de un inventario de emisiones, identificación de las fuentes de emisión, recopilación de la información, métodos de estimación de emisiones de $PM_{2.5}$, evaluación del inventario y elaboración del reporte final (ver figura 3.1). En cada una de las etapas es necesario realizar un aseguramiento y control de calidad; por esta razón, este último procedimiento es transversal a todas la etapas de la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$.

La estimación de las emisiones a la atmósfera, y en particular las de $PM_{2.5}$, se puede dividir de manera muy general en tres grandes categorías. Cuando las operaciones están muy bien caracterizadas, se puede llevar a cabo una medición directa de las emisiones; por otra parte, si es difícil tener un control completo sobre las operaciones, es necesario recurrir al uso de información subrogada, es decir, información que de forma indirecta nos permite estimar las emisiones sin necesidad de llevar a cabo mediciones directas. Finalmente, cuando las emisiones dependen de una compleja interacción entre diferentes factores, se recurre al uso de modelos matemáticos que permiten la realización de cálculos que toman en cuenta dichas interacciones para poder estimar las emisiones de un grupo de fuentes. En este capítulo se hace una breve descripción de la metodología de estimación de emisiones de

Figura 3.1 Proceso general para la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$



$PM_{2.5}$ de acuerdo con estas tres categorías, especificando el tipo de fuentes de emisión para las cuales es aplicable o recomendable cada una.

Los métodos de estimación que a continuación se presentan pueden aplicarse a dos tipos de partículas: las de tipo filtrable y las condensables. Las primeras incluyen el material particulado con un tamaño mayor al establecido por el poro del filtro de un tren de muestreo de partículas. Las segundas están formadas por materia en fase vapor a la temperatura de filtro que se colecta en las trampas del tren de muestreo (ver sección 1.1.4) [35].

3.1 Medición directa

Los métodos de medición directa de las emisiones de $PM_{2.5}$ a la atmósfera se fundamentan en diferentes principios; sin embargo, todos ellos se basan, de una u otra manera, en la toma de muestras del flujo cargado de partículas. Por lo tanto, uno de los principales aspectos a considerar en los métodos de medición directa es el muestreo. El objetivo principal de un buen muestreo es que sea representativo de su “universo”, que en este caso sería el flujo cargado con partículas que se descarga a la atmósfera durante un año. Para que un muestreo sea representativo debe contemplar todas las posibles variantes del “universo”, que en este caso se refieren a las fluctuaciones del flujo durante el muestreo, pero más ampliamente a las variaciones del proceso durante todo el periodo de operación en el que serán reportadas las emisiones. El muestreo debe llevarse a cabo directamente en la fuente para determinar la concentración de partículas $PM_{2.5}$ y, al mismo tiempo, determinar el flujo volumétrico del gas cargado de partículas. Al multiplicar el flujo volumétrico por la concentración de partículas se obtiene la cantidad de emisiones liberadas por unidad de tiempo. De igual forma, existen emisiones condensables, las que están formadas por materia en fase vapor a la temperatura de filtro que se colecta en las trampas del tren de muestreo, y que son analizadas por el método 202 de la EPA o sus equivalentes.

Muestreo en fuente

De los cuatro tipos de fuentes emisoras (fijas, de área, móviles y naturales), la medición directa de $PM_{2.5}$ se aplica principalmente para las fuentes fijas. Para el caso de las fuentes de área y las móviles, que son muy numerosas, y para las fuentes naturales existen otros métodos indirectos que se analizarán más adelante. Para el

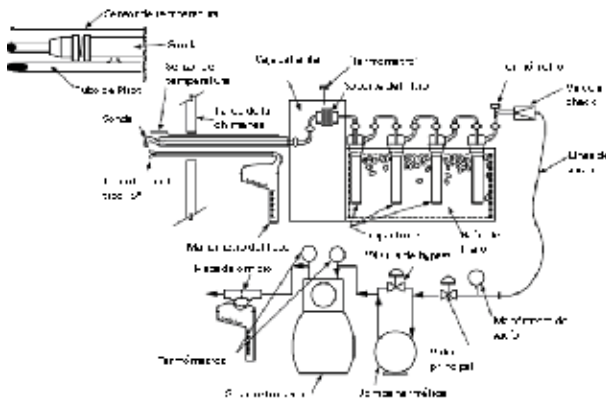
caso de las fuentes fijas, existen dos tipos esencialmente diferentes de muestreo en fuente: el monitoreo automático o continuo y el muestreo manual o discreto.

Los métodos de monitoreo continuo son muy precisos, ya que toman en cuenta todas las variaciones que ocurren en todo momento durante el periodo de reporte; sin embargo, tienen la desventaja de ser relativamente costosos. El principio más utilizado es el de medición de opacidad, que en realidad es una medida subrogada para determinar la concentración de partículas. Otros principios utilizados incluyen los métodos basados en la dispersión de luz, los de atenuación de radiación beta, de electrificación de sondas, de extinción de luz, el centelleo óptico, etc. Debe tenerse cuidado en la interpretación de los resultados de estos métodos, ya que, al basarse en principios diferentes, la definición de la concentración de una fracción determinada de partículas difiere de un método a otro. Por ejemplo, los métodos basados en la dispersión de luz correlacionan la intensidad de la luz dispersada con el diámetro de dispersión de las partículas, que difiere del diámetro aerodinámico usado en sistemas de separación aerodinámica. En el mejor de los casos, se pueden obtener correlaciones entre los resultados de uno y otro método para obtener consistencia entre ambos.

En México no se cuenta con muchos datos obtenidos a través de monitoreo continuo, ya que la NOM-085-SEMARNAT-1994, que únicamente establece límites máximos permisibles de emisiones de partículas suspendidas totales, requiere la medición de este contaminante solamente una o dos veces al año, dependiendo de la capacidad del equipo de combustión de que se trate. No obstante, sería recomendable la utilización de este tipo de métodos, pues esto permitiría una mayor precisión en los resultados de los estimados de emisiones de $PM_{2.5}$.

Los métodos de muestreo manual son métodos que extraen una muestra del flujo cargado con partículas para determinar su concentración en un periodo muy corto, durante el cual el flujo debe permanecer en estado estable. Estrictamente, la concentración así determinada representa un promedio de la concentración de partículas durante el tiempo en que se tomó la muestra, como si fuera una "foto instantánea" del flujo. Una de las características más importantes de estos métodos es la forma de extraer la muestra, ya que se debe asegurar que las partículas que son arrastradas por el flujo no se separen de este. En estado estacionario, las partículas que son arrastradas por el flujo se encuentran bajo un equilibrio de fuerzas, de mane-

Figura 3.2 Diagrama del tren de muestreo del método isocinético



Fuente [1]

ra que la fuerza neta sobre la partícula es cero. Cualquier variación en las condiciones del flujo ocasiona que este equilibrio se rompa, y como resultado ocurre la separación de las partículas del flujo. La consecuencia para el muestreo es que la sonda captura más o menos partículas que las que traía el flujo bajo condiciones de equilibrio. La forma correcta de llevar a cabo un muestreo de un flujo cargado de partículas es mediante la extracción de la muestra a la misma velocidad que lleva el flujo, lo que se conoce como muestreo isocinético.

El método para determinar la concentración de partículas suspendidas totales utilizado en México es precisamente el isocinético (ver figura 3.2), que es un método de medición directa, establecido por la NOM-085-SEMARNAT-2011 y descrito detalladamente en la norma NMX-AA-010-SCFI-2001; es mejor conocido como método 5, por ser esta la denominación que se le da entre los métodos aprobados por la EPA.

El método isocinético utiliza un tren de muestreo, como el que se ilustra en la figura 3.2, para extraer la muestra del flujo conducido por un ducto o chimenea. La punta de la sonda tiene una forma especial conocida como “cuello de ganso”, y su borde es afilado y está alineado con el flujo para minimizar las perturbaciones al flujo. La sonda completa está calentada a cierta temperatura estandarizada, de manera que todas las mediciones apegadas a este método sean comparables. Junto a la punta de la sonda está la punta de un tubo de Pitot, que se utiliza para conocer la velocidad a la que se debe extraer la muestra, así como un termopar para determinar la temperatura.

La muestra se extrae isocinéticamente y pasa por la sonda a temperatura controlada para llegar a la “caja caliente”, es decir, a un pequeño horno en cuyo interior se coloca el portafiltro, con el filtro de fibra de vidrio previamente acondicionado y en el que se capturarán las partículas. Hasta este punto, la temperatura de los gases es lo suficientemente alta como para evitar la condensación de la humedad de los gases.

Al salir de la caja caliente, los gases pasan a la “caja fría”, es decir, a una serie de impactores inmersos en un baño de agua en equilibrio con hielo. Los dos primeros impactores por los que pasan los gases contienen cierta cantidad de agua, de manera que los gases burbujan en ella. El tercer impactor inicialmente se pone vacío, y el cuarto se coloca con un lecho de sílica gel. El propósito de estos impactores es condensar cualquier vapor condensable a la temperatura de equilibrio entre el agua y el hielo, de modo que el gas ya sin partículas y sin humedad pase seco al tren de medición, que consiste en un gasómetro seco y una placa de orificio con los cuales se mide el flujo de gas.

El procedimiento del método isocinético además establece el número de puntos en la sección transversal del ducto o chimenea en los que se ha de extraer una parte de la muestra, así como las condiciones que debe cumplir el ducto para que el método sea aplicable. Entre otras, una de las más importantes es que el flujo debe estar completamente desarrollado, para lo cual se requiere que el punto de muestreo esté a una distancia después de cualquier perturbación mayor a 8 diámetros del ducto y a 4 diámetros del ducto antes de la siguiente perturbación. Después de tomar las muestras en todos los puntos de la sección transversal del ducto, el filtro se desmonta y se pesa para encontrar, por diferencia con el peso del filtro limpio, la masa de las partículas capturadas. Es necesario también hacer un lavado de sonda para recuperar las partículas que se quedaron adheridas a esta, que son partículas que llevaba el flujo muestreado. El procedimiento se repite una vez más para tener dos muestreos “definitivos”. Por otra parte, para determinar correctamente la velocidad de extracción de la muestra es necesario conocer de antemano la humedad del flujo cargado con partículas. Para ello, se realiza un muestreo preliminar, sin filtro, pero con los impactores instalados. La determinación de la humedad se realiza pesando la humedad atrapada en los impactores. Al final de cada muestreo se determina un parámetro conocido como “parámetro de isotetismo”, cuyo valor debe estar dentro de un rango preestablecido para garantizar que el muestreo fue efectivamente isocinético. El muestreo permite determinar la concentración de partículas y, al mismo tiempo, determinar el flujo volumétrico del gas cargado de partículas; con ambas cantidades se puede finalmente determinar las emisiones a la atmósfera.

La concentración de partículas se obtiene con la siguiente fórmula¹¹:

$$C_p = \frac{P_{TP}}{V_{CNBS}}$$

donde

C_p es la concentración de partículas [mg/m^3],

P_{TP} es el peso total de partículas colectadas durante el muestreo isocinético [mg], y

V_{CNBS} es el volumen de gas muestreado (en condiciones normales y base seca) [m^3].

La emisión de partículas se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$E = (10^{-9})C_p QT$$

donde

E es la emisión de partículas [toneladas (t)/período],

Q es el flujo volumétrico [m^3/h] en condiciones normales y base seca, y

T es el periodo durante el cual prevalecen las condiciones del muestreo [h].

Cabe recalcar que si bien el método isocinético proporciona una buena forma de muestrear las partículas en un flujo a determinadas condiciones, dicho muestreo solo representa las emisiones bajo las condiciones de operación en ese momento. Si esas condiciones de operación se mantuvieran estables durante todo un año, entonces las emisiones anuales podrían determinarse con ese solo muestreo. Sin embargo, en pocos casos ocurre esta situación; es más frecuente que existan variaciones en las condiciones de operación debido a cambios en los niveles de producción, condiciones de fuera de operación por mantenimientos, cambios debidos a fluctuaciones en los insumos o combustible, e incluso por condiciones climatológicas, etc. Por lo tanto, para obtener suficiente representatividad se debería realizar un muestreo para cada condición de operación, y utilizar los resultados de ese muestreo como representativo de todo el periodo durante el que dicha condición de operación prevaleció.

Suponiendo que se tienen n periodos de operación representativos, contiguos y que no se superpongan, cada uno de T_i horas, y que la suma de todos estos periodos resulte igual a un año, la emisión anual E [t/año] se puede obtener con la siguiente fórmula:

11. En la fórmula ya se consideran aplicadas las correcciones indicadas en la norma NMX-AA-010-SCFI-2001.

$$E = (10^{-9}) \sum_{i=1}^n C_{pi} Q_i T_i$$

donde el subíndice i se refiere al periodo de operación.

Con el método isocinético se obtiene la concentración de partículas totales. Para determinar las fracciones PM₁₀ o PM_{2.5} se debe conocer la distribución de tamaños, o bien las razones PM₁₀/PM o PM_{2.5}/PM. Una forma directa de obtener la concentración de partículas PM₁₀ se describe en el método 201-a de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA); este difiere del método 5 en la incorporación ya sea de un ciclón o de un impactor en cascada que separa la fracción PM₁₀ de la fracción total de partículas, de manera que solo se capturen las partículas de diámetro aerodinámico menor a 10 micras en el filtro utilizado para la determinación gravimétrica de la concentración de partículas. De la misma manera, existen ciclones con un punto de corte específico para PM_{2.5} que se utilizan para la determinación directa de las emisiones de PM_{2.5}; sin embargo, estos métodos raramente se utilizan en México. El método CTM-040 de la EPA, que explicaba cómo modificar el tren de muestreo del método 201-a para incluir el separador de PM_{2.5}, ahora ha quedado dentro del mismo método 201-a.

Los métodos para determinar la emisión de partículas condensables se basan en la captura de los gases que salen por las chimeneas y que son precursores de las PM_{2.5}, como se especifica, por ejemplo, en el método 202 de la EPA; este utiliza un tren de muestreo muy similar al del método 5, con dos excepciones: primera, la sonda debe ser de vidrio o recubierta de teflón; y segunda, los impactores se purgan inmediatamente después de la corrida con una corriente de nitrógeno (N₂) para eliminar el dióxido de azufre (SO₂). La solución de los impactores se extrae con cloruro de metileno, separando las fases resultantes. Las fracciones orgánica y acuosa se evaporan y desecan en su totalidad para obtener residuos secos, que en su conjunto representan el total de las partículas condensables.

En México no existe normatividad que limite la emisión de partículas PM_{2.5} provenientes de las fuentes fijas ni que establezca métodos de medición de este contaminante. Por lo anterior, no se cuenta con información generada periódicamente para la estimación de las emisiones de PM_{2.5} mediante métodos directos o muestreo en fuente.

3.2 Estimación indirecta

Los métodos de estimación indirecta son probablemente los más empleados debido a su sencillez y amplia aplicabilidad (para fuentes fijas, móviles, de área y naturales); sin embargo, debe tenerse en cuenta que son más inexactos que la medición directa, ya que implican la aceptación de una gran variedad de suposiciones que son difíciles de verificar. No obstante, los métodos de estimación indirecta acotan la magnitud de las emisiones y dan un buen indicio de la situación en cuanto a los niveles globales de emisiones. En esta sección se discutirán tres métodos comúnmente utilizados para estimar las emisiones de $PM_{2.5}$: el primero está basado en factores de emisión, el segundo en las emisiones de PM_{10} y el tercero en modelos matemáticos. Como se mencionó anteriormente, los métodos indirectos de estimación se basan en información subrogada, cuya recopilación se vuelve una de las principales tareas a realizar, ya que para cada categoría de fuente emisora la información es diferente.

Factores de emisión

El método de estimación basado en los factores de emisión es probablemente el más utilizado, especialmente en el caso de las $PM_{2.5}$. En sí, el método es muy sencillo y se resume en la siguiente ecuación:

$$E = A \times C \times F$$

donde E representa las emisiones estimadas, A es un dato de actividad, C un factor de corrección y F el factor de emisión. A continuación se discute el significado particular de los tres componentes de la ecuación anterior.

Los datos de actividad son valores que representan la intensidad de los procesos de producción de los contaminantes, es decir, qué tanto se lleva a cabo una actividad que genera contaminación. Los datos de actividad se expresan, por lo tanto, en función de un parámetro representativo de la actividad, que puede estar relacionado directa o indirectamente con dicha actividad. Por ejemplo, en el caso de la combustión de algún combustible, las $PM_{2.5}$ se generan durante el proceso mismo de combustión, y entre más combustible se quema, más partículas se generarán; en este caso A , estaría dado en función de la cantidad de combustible quemado. Así, para una fuente fija, el dato de actividad sería la cantidad de horas durante las que está en funcionamiento el equipo de combustión o quemador, y para una fuente móvil el dato de actividad sería el número de kilómetros recorridos por el vehículo.

Frecuentemente, para fuentes móviles los datos de actividad no se pueden obtener directamente, en cuyo caso es necesario estimarlos a través del uso de información de remplazo o subrogada, por ejemplo, a partir de la información de encuestas. En conclusión, cada subcategoría de fuentes de emisión de PM_{2.5} se asocia con una actividad particular, y con ello se define el correspondiente dato de actividad y su factor de emisión.

El factor de corrección generalmente se define en términos de la eficiencia de los sistemas de control utilizados para reducir las emisiones, de la siguiente manera:

$$C = 1 - h$$

donde η es la eficiencia del sistema de control, dada en forma fraccional (por ejemplo, una eficiencia del 98 % de remoción de partículas implica que $h=0.98$). Cuando no hay sistemas de control de emisiones se considera que su eficiencia es 0, por lo que el factor de corrección es simplemente 1.

La principal fuente de información con respecto a los factores de emisión es la EPA, ya que ha asumido la extensa tarea de compilar dichos factores para una gran cantidad de fuentes, a partir de lo cual se hace un reporte conocido como AP-42 que se actualiza por lo menos cada 3 años. Originalmente el AP-42 se dividía en dos volúmenes; el volumen I cubre fuentes fijas y de área, e incluso fuentes naturales, y el volumen II era para fuentes móviles. Actualmente el volumen II se ha descontinuado, ya que los factores de emisión de este volumen se han integrado en las versiones más recientes de los modelos de emisión para fuentes móviles (ver sección 3.2.2). El volumen I se organiza en 15 capítulos, cada uno de los cuales cubre un grupo de actividades o procesos similares. Cada capítulo se divide en secciones que contienen un tipo particular de proceso o actividad, a partir del cual se definen los factores de emisión, los datos de actividad y el factor de corrección. A continuación se presentan ejemplos sobre el uso de estos factores de emisión.

Uso de factores de emisión para estimar emisiones de PM_{2.5} de fuentes fijas

Para estimar las emisiones provenientes de fuentes fijas, como se explica más ampliamente en la *Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas* [4], el primer paso es la identificación de la fuente y su jurisdicción, con el fin de obtener información sobre su actividad, y su clasificación, para poder obtener factores de emisión aplicables a la subcategoría de fuente de la que se trate.

El cuadro 3.1 puede servir como una guía rápida, y por ende no exhaustiva, para determinar las posibles fuentes de emisión de PM_{2.5}.

En dicho cuadro se enumeran las categorías potenciales de emisión de PM_{2.5}, tanto de fuentes puntuales como de fuentes de área y móviles. Este cuadro se presenta como una guía para ayudar a los usuarios a concentrar eficientemente sus esfuerzos para obtener un inventario de emisiones, y se fundamenta en un análisis de la base de datos del Inventario Nacional de Emisiones de la EPA, 1999. El cuadro muestra dónde ocurren las emisiones más significativas de PM_{2.5} dentro de la base de datos de la EPA.

Las designaciones A (alto), M (medio) y B (Bajo) indican el nivel de significancia de una fuente de emisión respecto a la emisión total de la categoría correspondiente. Un signo (-) indica que pueden existir emisiones de esa categoría, pero no se consideran significativas. Una celda en blanco indica que no hay emisiones registradas en la base de datos NEI de la EPA para esa categoría de fuente.

Cuadro 3.1 Fuentes potenciales de emisión de PM_{2.5}

Fuente [29] * Las designaciones A (alto), M (medio) y B (Bajo) indican el nivel de significancia de una fuente de emisión respecto a la emisión total de la categoría correspondiente. El signo (-) indica que pueden existir emisiones de esa categoría, pero no se consideran significativas. Una celda en blanco indica que no hay emisiones registradas en la base de datos NEI de la EPA para esa categoría de fuente.

A. CATEGORÍA: FUENTES FIJAS	Aporte a las PM _{2.5} *
Quema de Combustibles - Servicios Eléctricos	
Carbón	A
Gas	M
Combustión Interna	M
Combustóleo	M
Otro	B
Quema de Combustibles-Industrial	
Carbón	M
Gas	A
Combustión Interna	M
Combustóleo	M
Otro	M
Quema de Combustibles-Otros	
Carbón Comercial/Institucional	B
Gas Comercial/Institucional	B
Combustóleo Comercial/Institucional	B
Combustión Miscelánea de Combustible (Excepto Residencial)	B
Fabricación de Productos Químicos y Afines	
Fabricación de Productos Químicos Agrícolas	B
Fabricación de Productos Químicos Inorgánicos	B
Fabricación de Productos Químicos Orgánicos	B
Fabricación de Pinturas, Barnices, Lacas, Esmaltes	-
Fabricación de Productos Farmacéuticos	B
Polímeros y Fabricación de Resina	B
Fabricación de Otros Productos Químicos	M
Procesamiento de Metales	
Transformación de Metales Ferrosos	M
Procesamiento de Metales (NC)	B
Procesamiento de Metales no Ferrosos	M
Petróleo e Industrias Afines	
Fabricación de Asfalto	B
Producción de Petróleo y Gas	-
Refinerías de Petróleo e Industrias Afines	B
Otros Procesos Industriales	
Agricultura, Alimentación y Productos Afines	M
Equipos Electrónicos	B
Productos de Maquinaria	B
Productos Minerales	A
Varios Procesos Industriales	-
Caucho y Diversos Productos de Plástico	B
Textiles, Cuero y Prendas de Vestir	B
Madera, Pulpa y Papel y Productos Editoriales	A

B. CATEGORÍA: FUENTES DE ÁREA	Aporte a las PM _{2.5} *	B. CATEGORÍA: FUENTES DE ÁREA (cont.)	Aporte a las PM _{2.5} *
Quema de Combustibles - Servicios Eléctricos		Almacenamiento y Transporte	
Gas	-	Almacenamiento de Materiales a granel	-
Quema de Combustibles - Industrial		Plantas y Terminales de Carga	
Carbón	B	Almacenamiento de Productos Químicos Orgánicos	
Gas	M	Transporte de Productos Químicos Orgánicos	
Combustión Interna	-	Almacenamiento de Petróleo y de Productos Petrolíferos	
Combustóleo	B	Transporte de Petróleo y de Productos Petrolíferos	
Otros	B	Estaciones de Servicio: Respiración y Vaciado	
Quema de Combustibles-Otros		Estaciones de Servicio: Etapa I	
Carbón Comercial/Institucional	B	Estaciones de Servicio: Etapa II	
Gas Comercial/Institucional	M	Disposición de Residuos y Reciclaje	
Combustóleo Comercial/Institucional	B	Incineración	B
Combustión Miscelánea de Combustible (Excepto Residencial)	B	Aguas Residuales Industriales	
Residencial-Madera	A	Rellenos Sanitarios	-
Residencial-Otros	M	Quema a Cielo Abierto	A
Fabricación de Productos Químicos y Afines		Obras Públicas de Tratamiento	
Fabricación de Productos Químicos Inorgánicos	-	Plantas de Tratamiento, Almacenamiento o Disposición	
Fabricación de Productos Químicos Orgánicos		Otros	
Fabricación de Productos Farmacéuticos		Misceláneas	
Fabricación de Polímeros y Resinas		Agricultura y Silvicultura	A
Procesamiento de Metales		Emisiones por Accidentes/Catástrofes	
Procesamiento de Metales Ferrosos		Servicios de Salud	
Procesamiento de Metales (NC)	-	Otros de Combustión	A
Procesamiento de Metales No Ferrosos		Otros	
Petróleo e Industrias Afines		Cultivos Agrícolas (Siembra Directa)	M
Fabricación de Asfalto	-	Construcción	H
Producción de Gas y Petróleo	B	Carreteras Pavimentadas	H
Refinerías de Petróleo e Industrias Afines		Carreteras sin Pavimentar	H
Otros Procesos Industriales		Polvos Fugitivos-Otros (e.g. Minas y Canteras)	M
Agricultura, Alimentación y productos afines	B	C. CATEGORÍA: FUENTES MÓVILES	
Productos de Maquinaria		PM _{2.5}	
Productos Minerales	B	Vehículos que Circulan por Carretera	
Procesos Industriales Misceláneos	B	Vehículos de diésel	A
Caucho y Diversos Productos de Plástico	-	Vehículos de Gasolina de Carga Pesada	B
Madera, Pulpa y Papel, y Productos Editoriales	B	Camiones de Gasolina de Carga Ligera	M
Utilización de Solventes		Vehículos y Motocicletas de Gasolina de Carga Ligera	M
Desengrasado		Vehículos que No Circulan por Carretera	
Servicio de Tintorería		Aviones	B
Artes Gráficas		Barcos	M
No Industrial		Vehículos de diésel	A
Otro Industrial		Vehículos de Gasolina	M
Utilización de Solvente (NC)		Ferrocarriles	M
Superficie de Revestimiento		Oros	B

Asimismo se presenta en el cuadro 3.2 las metodologías recomendadas para la estimación de PM_{2.5} en las diferentes categorías y subcategorías de fuentes de emisión. Como complemento, el cuadro 3.3 muestra la metodología general aplicada para la estimación de emisiones de este contaminante en el INEM año 2005.

Cuadro 3.2 Metodologías de estimación de PM_{2.5} a partir de las diferentes fuentes de emisión

Categoría	Subcategoría	Recomendado/método preferido para estimación de PM _{2.5} ¹
Fuentes fijas		
Plantas de generación eléctrica	Combustión por tipo de combustible	FE/MD
Industria química	Combustión y emisión de procesos	FE/MD
Refinación petrolera (a)	Emisiones de combustión	FE/MD
Producción metálica primaria (a)	Emisiones de proceso	FE/MD
	Emisiones de combustión	FE/MD
	Emisiones fugitivas	BM/MD
Producción metálica secundaria (a)	Emisiones de proceso	FE/MD
	Emisiones de combustión	FE/MD
Producción cementera (a)	Emisiones de proceso	FE/MD
	Emisiones de combustión	FE/MD
	Emisiones fugitivas	FE/MD
Producción minera miscelánea (a)	Emisiones de proceso	FE/MD
	Emisiones de combustión	FE/MD
	Emisiones fugitivas	FE/MD
Industria automotriz (a)	Emisiones de combustión	FE/MD
Industria maderera (a)	Emisiones de proceso	FE/MD
	Emisiones de combustión	FE/MD
Producción de petróleo y gas (a)	Emisiones de combustión	FE/MD
Explotación de minas/canteras (a)	Emisiones de proceso	FE/MD
	Emisiones fugitivas	FE/MD
Manufactura de productos de madera (a)	Emisiones de proceso	FE/MD
	Emisiones de combustión	FE/MD
Industria azucarera (a)	Emisiones de proceso	FE/MD
	Emisiones de combustión	FE/MD
	Emisiones fugitivas	FE/MD
Producción de metales elaborados (a)	Emisiones de proceso	FE/MD
	Emisiones de combustión	FE/MD
Industria textil	Emisiones de combustión	FE/MD
Rellenos sanitarios	Incineradores de residuos urbanos	FE/MD
	Quema de residuos a cielo abierto	FE/MD
Plantas de asfalto	Emisiones de proceso	FE/MD
	Emisiones de combustión	FE/MD
Industria alimenticia y agricultura	Emisiones de proceso	FE/MD
	Emisiones de combustión	FE/MD

Categoría	Subcategoría	Recomendado/ método preferido para estimación de PM _{2.5} ¹
Fuentes de área		
Combustión comercial	Por tipo de combustible	Factores de emisión del AP42
Combustión residencial	Combustibles convencionales	(se han desarrollado factores de emisión específicos para cada categoría)
Combustión residencial	Biomasa o derivados de residuos	
Producción agrícola	Ganado	
Incineración en sitio	N/A	
Quema a cielo abierto	N/A	
Baños públicos	N/A	
Vendedores ambulantes/ cocinar	N/A	
Fuentes móviles		
Todo tipo de vehículos	Tipo de combustible	FE

Fuente [36]

1 FE: factor de emisión, MD: medición directa, BM: balance de materia.

2 El combustible conocido en México como combustóleo corresponde al combustible n° 6 de Estados Unidos.

3 El combustible diésel utilizado en México corresponde al combustible n° 2.

4 Los destilados de petróleo incluyen gasolinas, naftas y queroseno.

Cuadro 3.3 Estimación de emisiones de PM_{2.5} en el Inventario Nacional de Emisiones de México, año 2005

Tipo de fuente	Metodología aplicada
Fijas	La información que describe el tipo y la intensidad de las actividades industriales es recopilada principalmente de la COA, que es el reporte anual de actividades de la industria de jurisdicción federal; algunos estados también tienen reportes similares a este. La estimación de las emisiones de las actividades de combustión y de proceso generalmente se realiza utilizando factores de emisión que se obtienen del AP-42 de la EPA.
Área	Las emisiones generadas por fuentes de área se estiman, en su mayoría, a partir de datos que describen la intensidad de la actividad y los factores de emisión; estos últimos relacionan la cantidad de contaminantes emitidos con la intensidad de la actividad.
Móviles	Para calcular los factores de emisión se utilizó el modelo MOBILE6.2 México, el mismo programa que calcula las emisiones dada la distribución vehicular.

Fuente [35]

Cuadro 3.4 Ejemplos de factores de emisión del AP-42 para combustión

Configuración del equipo de combustión	Material particulado total (PST) filtrable ^f	
	Factor de emisión (lb/10 ³ gal) ^a	Clasificación del factor de emisión
Calderas > 100 millones Btu/h		
Combustóleo, quemador normal	9.19(S)+3.22	A
Combustóleo, quemador tangencial	9.19(S)+3.22	A
Diésel	2	A
Calderas < 100 millones Btu/h		
Combustóleo	9.19(s)+3.22 ⁱ	B
Destilado de petróleo ¹	2	A
Horno residencial	0.4 ^g	B

^a Para convertir de lb/10³ gal a kg/10³ L, multiplicar por 0.120.

^f Referencias 6-8, 10, 13-15, 56-60, 62-63. El material particulado filtrable consiste en las partículas colectadas en o antes del filtro según el método 5 de muestreo de la EPA (o equivalente). El factor de emisión para partículas de combustóleo es, en promedio, función del % en peso de azufre presente en el combustible. Por ejemplo, si el combustible tiene 1 % de azufre, entonces S = 1.

^g Basado en información de quemadores de nuevo diseño. Los quemadores de diseño anterior a 1970 pueden emitir hasta 3.0 lb/10³ gal de material particulado.

ⁱ El factor de emisión del diésel n° 6 y del n° 5 fueron invertidos. Error del 28 de abril, 2000. Sección corregida en mayo del 2010.

¹ Los destilados de petróleo incluyen las gasolinas, naftas y queroseno.

Cuadro adaptado de la fuente [30]

Debe tenerse en cuenta que las prioridades locales para el desarrollo de un inventario pueden variar dependiendo de la naturaleza de las fuentes en la zona y de los objetivos del mismo inventario.

Una vez definido el tipo de establecimiento, el siguiente paso es identificar, dentro de la fuente de emisión, los equipos y procesos en los que puede generarse la emisión del contaminante. Por ejemplo, en el rubro de generación de energía eléctrica, una carboeléctrica puede presentar emisiones de partículas provenientes del equipo utilizado para la quema del carbón, pero también puede presentar emisiones de partículas provenientes del manejo del carbón y de las cenizas.

El siguiente paso es recolectar los datos de actividad de la fuente emisora y la información sobre las características de los equipos utilizados, a través de las cédulas de operación anual de los establecimientos. Finalmente, llega el momento de seleccionar el factor de emisión que se utilizará para estimar las emisiones de PM_{2.5}.

En el caso del ejemplo del sector eléctrico, en México se utiliza de manera muy importante el combustóleo¹² para gene-

¹² El combustóleo es una fracción del petróleo que se obtiene como residuo en la destilación fraccionada.

ración eléctrica. En este tipo de termoeléctricas se utilizan generadores que se consideran de combustión externa, y los factores de emisión se encuentran dentro del AP-42, en el capítulo 1, sección 3. También puede utilizarse la herramienta de la EPA para obtener factores de emisión (Factor Information Retrieval System, FIRE).

En el cuadro 3.4 se muestra un ejemplo de la información que contiene el AP-42, donde se indican los factores de emisión correspondientes a los equipos de generación de electricidad.

Vale la pena mencionar que las notas de los cuadros del AP-42, como la mostrada en el cuadro 3.4, contienen información muy importante. En este caso, la nota indica que el factor de emisión asentado se refiere a la emisión de partículas determinada por el método 5 que, como se indicó en la sección sobre métodos de estimación de emisiones por medición directa, es un procedimiento para determinar partículas totales.

Como se puede ver, en el cuadro 3.4 se especifican algunas características de los equipos que determinan la selección final del factor de emisión; entre ellas están:

- Los intervalos de capacidad de generación, ya que según el tamaño de la caldera es su método de construcción, y esto tiene efectos en las emisiones.
- Otra característica del proceso es el tipo de combustible que utiliza, pues de este depende la cantidad de emisiones. Puede notarse que algunos factores de emisión vienen en función del contenido de azufre (S) del combustible.
- La configuración de los quemadores, por las mismas razones.

En el cuadro 3.4 también se muestra la clasificación de los factores de emisión, que se utiliza para describir la confiabilidad, precisión y exactitud de los factores de emisión, si bien en forma cualitativa solamente. El significado de esta clasificación es el siguiente:

A = Excelente. El factor de emisión se desarrolló principalmente a partir de datos de prueba valorados A y B tomados de muchas instalaciones elegidas al azar de una población industrial. La población de la categoría de fuente es lo suficientemente específica como para minimizar la variabilidad.

B = Por arriba de la media. El factor de emisión se desarrolló principalmente de datos de prueba valorados A y B tomados de un número moderado de instalaciones. Aunque no es evidente un sesgo específico, no está claro si las

- instalaciones examinadas representan una muestra aleatoria de la industria. Al igual que con la clase A, la población de la categoría de fuente es lo suficientemente específica como para minimizar la variabilidad.
- C = Media. El factor de emisión se desarrolló principalmente a partir de datos de prueba de clasificación A, B y C de un número razonable de instalaciones. Aunque no es evidente un sesgo específico, no está claro si las instalaciones probadas representan una muestra aleatoria de la industria. Al igual que con la clase A, la población de la categoría de fuente es lo suficientemente específica como para minimizar la variabilidad.
- D = Debajo de la media. El factor de emisión se desarrolló principalmente a partir de datos de prueba de clasificación A, B y C de un pequeño número de instalaciones, y puede haber motivos para sospechar que estas instalaciones no representan una muestra aleatoria de la industria. También puede haber evidencia de variabilidad dentro de la población de fuentes.
- E = Pobre. El factor de emisión se desarrolló a partir de datos de prueba valorados C y D de un número muy limitado de instalaciones, y puede haber motivos para sospechar que las instalaciones analizadas no representan una muestra aleatoria de la industria. También puede haber evidencia de variabilidad dentro de la población de la categoría de fuente.

En el caso específico del cuadro 3.5, los factores de emisión se refieren a las emisiones de partículas suspendidas totales filtrables (método 5); por lo tanto, para estimar las emisiones totales de $PM_{2.5}$ es necesario estimar la componente de partículas condensables que el método 5 no detecta, y tomar en cuenta que las $PM_{2.5}$ son solo una fracción de las partículas totales. Además, no hay que perder de vista que el combustible n° 6 (n° 6 oil), que aparece en la tabla 1.3-1 del AP-42, corresponde al combustible utilizado en México, y el de tipo n° 2 (n° 2 oil), al diésel.

Para determinar la fracción de las partículas totales que representan las $PM_{2.5}$, en la misma sección del AP-42 se incluye la tabla de distribución de tamaños de las partículas. Por lo general, estas distribuciones se presentan en forma acumulable hasta cierto tamaño, y es necesario saber si las instalaciones cuentan con controles de emisión de partículas y de qué tipo (ver cuadro 3.5). En este caso, si el valor 2.5 μm está explícito en la tabla, entonces la fracción correspondiente es directamente la fracción de partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 μm ; de otra forma, habrá que llevar a cabo un proceso de interpolación para determinar dicha fracción.

La fracción obtenida debe multiplicarse por las emisiones de partículas totales para obtener las emisiones de PM_{2.5}.

En cuanto a las partículas condensables, en la misma sección del AP-42 se incluye una tabla con los factores de emisión, que se reproduce íntegramente en el cuadro 3.6.

Para este caso en particular, los factores de emisión de la fracción condensable de las partículas son aplicables independientemente de que se cuente con algún tipo de control de emisión de partículas (ya que estos sistemas no logran capturar los vapores precursores de las partículas condensables), pero para otro tipo de fuentes podría no ser así.

Cuadro 3.5 Distribución del porcentaje acumulado de la masa por tamaño de partícula y factores de emisión para las calderas que queman combustible^a

Tamaño de partícula ^b (μm)	% de masa acumulado hasta el tamaño indicado			Factor de emisión acumulado lb/10 ³ gal					
	Sin control	Controlado		Sin control ^c		Control PE ^d		Control lavadores ^e	
		PE	Lavadores	FE	CFE	FE	CFE	FE	CFE
15	80	75	100	6.7 ^a	C	0.05A	E	0.50A	D
10	71	63	100	5.9 ^a	C	0.042A	E	0.050A	D
6	58	52	100	4.8 ^a	C	0.035A	E	0.050A	D
2.5	52	41	97	4.3 ^a	C	0.028A	E	0.48A	D
1.25	43	31	91	3.6 ^a	C	0.021A	E	0.46A	D
1.00	39	28	84	3.3 ^a	C	0.018A	E	0.42A	D
0.625	20	20	64	1.7 ^a	C	0.007A	E	0.32A	D
Total	100	100	100	8.3 ^a	C	0.067A	E	0.50A	D

^a Referencia 26. Código de clasificación de fuente 1-01-004-01/04/05/06 y 1-01-005-04/05. Para convertir de lb/10³ gal a kg/m³, multiplicar por 0.120. PE=precipitador electrostático, FE=factor de emisión y CFE=clasificación del FE.

^b Expresado en diámetro aerodinámico.

^c Los factores de emisión de partículas para combustible residual sin control de la emisión son, en promedio, función del tipo de combustible y del contenido de azufre en % de peso. Por ejemplo, si el combustible tiene 1.00 % de azufre, S=1.

Combustible n° 6: $A = 1.12(S)+0.37$

Combustible n° 5: $A = 1.2$

Combustible n° 4: $A = 0.84$

^d La eficiencia de control estimada para PE es de 99.2 %.

^e La eficiencia de control estimada para lavadores es de 94 %.

Fuente [31]

Cuadro 3.6 Ejemplo de los factores de emisión de las partículas condensables^a

Configuración del equipo (SCC)	Controles	MPC-TOT ^{c, d}		MPC-IOR ^{c, d}		MPC-ORG ^{c, d}	
		Factor de emisión (lb/10 ³ gal)	CFE	Factor de emisión (lb/10 ³ gal)	CFE	Factor de emisión (lb/10 ³ gal)	CFE
Diésel (1-01-005-01) (1-02-005-01) (1-03-005-01)	Con o sin control	1.3 ^{d, e}	D	65 % de MPC-TOT ^c	D	35 % de MPC-TOT ^c	D
Combustóleo (1-01-004-01/04) (1-02-004-01) (1-03-004-01)	Con o sin control	1.5 ^f	D	85 % de MPC-TOT ^d	E	15 % de MPC-TOT ^d	E

^a Todo el material particulado condensable se supone que es menor de 1 micra de diámetro.

^c MPC-TOT = material particulado condensable total.

MPC-IOR = material particulado condensable inorgánico.

MPC-ORG = material particulado condensable orgánico.

CFE = clasificación del factor de emisión

^d Para convertir a lb/MMBtu del combustible n° 2, se divide por 140 MMBtu/10³ gal. Para convertir a lb/MMBtu del n° 6, se divide por 150 MMBtu/10³ gal.

^e Referencias 76-78.

^f Referencias 79-82.

Fuente [32]

Finalmente, se deben considerar por separado todas las fuentes dentro de una instalación determinada. Por ejemplo, si en la central termoeléctrica operan varias unidades, cada unidad podría tener sus propias características (unas podrían quemar gas y otras combustóleo, unas podrían tener lavadores y otras no, o podrían tener diferentes capacidades). A continuación se presenta un ejemplo de todo el proceso de estimación de emisiones de PM_{2.5} provenientes de fuentes fijas.

Considérese una termoeléctrica de cuatro unidades de más de 100 millones de Btu/h (aprox. 30 MW termal) que quema combustóleo a razón de 2 448 301 m³ al año en sus cuatro unidades, las que a falta de mayor información se supondrá que son exactamente iguales y operan exactamente de la misma forma. No se especifica la configuración del quemador, así que se supone que es normal (en este caso no hay consecuencia, ya que aun con la configuración tangencial o quemando con quemadores de bajo NOx, el valor del factor de emisión es el mismo). El factor de emisión de la tabla requiere el contenido de azufre en el combustible; este se

consulta en las hojas de especificación del combustible que da el proveedor, en este caso PEMEX, y es de 3.699 %. El combustóleo es un combustible residual similar al n° 6, así que se toma el factor de emisión para PM, que es igual a:

$$F = 9.19(S) + 3.22 \text{ lb}/10^3 \text{ gal}$$

$$S = 3.699$$

$$F = 9.19 (3.699) + 3.22 \text{ lb}/10^3 \text{ gal}$$

$$F = 37.21381 \text{ lb}/10^3 \text{ gal}$$

$$F = 37.21381 \text{ lb}/10^3 \text{ gal} (0.120) = 4.4656572 \text{ kg}/10^3 \text{ L}$$

Tampoco se cuenta con información sobre equipos de control de partículas, por lo que se supone que no hay equipos de control. Por lo tanto, $\eta=0$ y $C=1$.

Finalmente, dado que el dato de actividad (A) está dado en m³, hay que hacer la conversión a litros (1 m³ = 1000 L).

$$A = 2\,448\,301 \text{ m}^3/\text{año} (1000) = 2\,448\,301\,000 \text{ L/año}$$

Por lo tanto, las emisiones de PST serán

$$E_{\text{PST}} = (2\,448\,301\,000 \text{ L/año})(1)(4.4656572 \text{ kg}/10^3 \text{ L}) =$$

$$(2\,448\,301\,000 \text{ L/año})(1)(0.0044656572 \text{ kg}/\text{L}) = 10\,933\,272 \text{ kg/año}$$

Y en toneladas métricas/año quedaría:

$$E_{\text{PST}} = 10\,933 \text{ t/año}$$

De acuerdo con la distribución de tamaños del cuadro 3.5, el 52 % en masa de las partículas totales es menor a 2.5 μm en diámetro aerodinámico. Por lo tanto, las emisiones de PM_{2.5} filtrables son:

$$E_{\text{PM}_{2.5f}} = (0.52)(10\,933 \text{ t/año}) = 5685 \text{ t/año}$$

La emisión de partículas condensables se calcula de la siguiente forma:

El factor de emisión para combustóleo se toma del cuadro 3.6 como 1.5 lb/10³ gal:

$$F = 1.5 \text{ lb}/10^3 \text{ gal} (0.120) = 0.18 \text{ kg}/10^3 \text{ L}$$

Por lo tanto, las emisiones de partículas condensables totales serán:

$$E_{\text{PCT}} = (2\ 448\ 301\ 000 \text{ L/año})(1)(0.18 \text{ kg}/10^3 \text{ L}) = \\ (2\ 448\ 301\ 000 \text{ L/año})(1)(0.00018 \text{ kg/L}) = 440\ 694 \text{ kg/año}$$

Y en t/año quedaría:

$$E_{\text{PCT}} = 440.6 \text{ t/año}$$

Sumando ambas contribuciones, filtrables más condensables, se tiene el resultado final:

$$E_{\text{PM}_{2.5}} = 5685 \text{ t/año} + 440.6 \text{ t/año} = 6126 \text{ t/año.}$$

Uso de factores de emisión para estimar emisiones de $PM_{2.5}$ de fuentes de área

Las fuentes de área incluyen conjuntos de establecimientos, tanto industriales como comerciales y de servicios, que por lo general no se evalúan individualmente, sino precisamente como un conjunto de fuentes emisoras distribuido en cierta región geográfica; sin embargo, las fuentes de área utilizan la misma metodología de estimación por medio de factores de emisión que se describió para las fuentes fijas en los párrafos anteriores.

Las fuentes de información de donde pueden obtenerse los factores de emisión y los datos de actividad de las fuentes de área son muy variadas, ya que se refieren a una gran diversidad de actividades, tales como servicios de lavandería, actividades de cocción de alimentos en la calle, uso de combustibles en el sector doméstico, etc.

Respecto a los datos de actividad, entre las fuentes de información más importantes en México se encuentran el INEGI, la SEMARNAT, la SAGARPA, PEMEX, la CFE, la SENER, la SCT y otras dependencias gubernamentales federales y estatales. Cuando los datos de actividad no están disponibles como fueron definidos, es posible utilizar información subrogada, como ya se ha mencionado. Esto amplía la gama de fuentes de información de donde se pueden obtener los datos necesi-

rios. El uso de información subrogada debe utilizarse con buen juicio ingenieril, ya que generalmente requieren simplificaciones y suposiciones que pueden hacer que los datos pierdan fidelidad por cada suposición o simplificación que se aplique. Sin embargo, cuando se cuenta con información muy completa y detallada es posible incluso utilizar la información subrogada para verificar información que se obtiene en forma directa. Por ejemplo, PEMEX puede proporcionar datos muy detallados de las ventas (en litros) de los combustibles (diésel, combustóleo, gasolinas), así como de sus contenidos de azufre. Con esta información se pueden estimar las emisiones de SO_2 , y a partir de estas llevar a cabo la conciliación de las fuentes móviles, ajustando los datos de actividad.

Cuando no existe mucha información sobre un proceso de emisión, se utilizan valores “típicos” o valores “peor escenario”. En muchos casos, los factores de emisión no pueden considerarse universales, ya que dependen de muchos elementos. La cantidad de información por conseguir se vuelve mucho mayor, y las fuentes de información mucho más variadas. Como ejemplo, considérese el factor de emisión de las emisiones de $PM_{2.5}$ debidas a la erosión del suelo por el efecto del viento. En el inventario de emisiones del D.F. de 2004 se utilizó la siguiente ecuación para determinar el factor de emisión de las emisiones de partículas totales:

$$E = FS \times I \times C \times K \times L' \times V'$$

donde

E = factor de emisión de partículas suspendidas totales (t/acre/año)

FS = fracción de las pérdidas totales por erosión del viento medidas como partículas suspendidas (adimensional)

I = potencial de erosión del suelo (t/acre/año)

C = factor climático (adimensional)

K = factor de rugosidad del suelo (adimensional)

L' = factor de amplitud del campo sin protección (adimensional)

V' = factor de cobertura vegetal (adimensional)

Para una discusión más detallada de esta ecuación, véanse las referencias [3-5]. En esta ecuación, FS es un parámetro que generalmente se toma como 0.025 para cualquier situación, aunque esto podría no ser del todo preciso [3, 6]. La erosionabilidad del suelo es un parámetro que depende de la cantidad de agregados

de suelo de tamaño tal que puedan ser removidos por el viento. Se determina por medio de un cribado en seco estándar, y obviamente depende de las características locales del suelo. Solamente en el D.F. se ubicaron 6 zonas diferentes, aunque por simplicidad se utilizó un único valor.

El factor climático depende particularmente de la velocidad del viento y de las tasas de precipitación y evaporación. Nuevamente esta información varía ampliamente a lo largo del territorio nacional, por lo que debería utilizarse información de estaciones climatológicas locales, incluso y de preferencia en función de las estaciones del año. Como ejemplo de la gran variabilidad de este factor, los factores climáticos calculados en la ZMVM varían de 0.00018 a 0.0161 (casi 100 veces) de la región sudoriental a la región poniente.

Los factores de rugosidad del suelo, de amplitud del campo sin protección y de cobertura vegetal también varían ampliamente, y la información para determinarlos se tiene que obtener de fuentes muy diversas, incluidas, posiblemente, el INEGI, la SAGARPA, el CONAFOR, la SEMARNAT y estudios realizados *ad hoc*.

Finalmente, la fracción de $PM_{2.5}$ se determina mediante el análisis de las fracciones finas de los limos, lo cual debería hacerse para cada tipo de suelo [4].

En resumen, con el fin de obtener factores de emisión más exactos se requiere analizarlos detalladamente para determinar qué elementos influyen en ellos y, en consecuencia, qué información debe tenerse disponible para su determinación, cuáles serían las fuentes de información más apropiadas, o si se requiere realizar estudios *ad hoc* para obtenerla.

En cuanto a los factores de emisión, el AP-42 sigue siendo una de las fuentes de información más importantes, pero existen otras posibles fuentes de donde pueden obtenerse estos factores. En el cuadro 3.7 se presenta un resumen de los factores de emisión para fuentes de área utilizados en el INEM 1999 para la estimación de las emisiones de $PM_{2.5}$, junto con las fuentes de información de las cuales se obtuvieron tanto los factores como los datos de actividad.

Uso de factores de emisión para estimar emisiones de PM_{2.5} de fuentes móviles no carreteras

Para el caso de las fuentes móviles no carreteras se utiliza el factor de emisión de forma similar al caso de las fuentes fijas y de área.

A continuación se presenta un ejemplo para estimar emisiones de PM_{2.5} provenientes de una locomotora [23]. Las locomotoras realizan esencialmente dos tipos de operaciones: las de maniobra en las estaciones o puntos de cruce (operaciones de patio), y las de arrastre de trenes por las vías tendidas a lo largo de casi 20 000 km en el país. Se estima que aproximadamente el 2.5 % del combustible utilizado se usa en operaciones de patio. Por ejemplo, los factores de emisión para las locomotoras utilizados en el INEM 1999 [23] fueron:

$F_{PM_{2.5}} = 1.59 \text{ kg/m}^3$, para las operaciones de arrastre

$F_{PM_{2.5}} = 2.19 \text{ kg/m}^3$, para las operaciones de patio

Los datos de actividad, que en este caso consisten en datos de consumo de combustible, se obtuvieron de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes:

Consumo nacional de combustible en ruta: 589 300 m³

Consumo nacional de combustible en patio: 15 200 m³

En el caso de las locomotoras no se considera que estas utilicen controles de emisión de partículas. Por lo tanto, las emisiones se calculan directamente mediante el producto del factor de emisión por el dato de actividad:

$$E_{PM_{2.5}} = (589\,300 \text{ m}^3)(1.59 \text{ kg/m}^3) = 936\,987 \text{ kg} = 937.0 \text{ t}$$

$$E_{PM_{2.5}} = (15\,200 \text{ m}^3)(2.19 \text{ kg/m}^3) = 33\,288 \text{ kg} = 33.2 \text{ t}$$

Es muy común obtener la información a nivel global, por ejemplo, consumos nacionales, que es necesario desagregar para obtener las emisiones a nivel estatal; para ello se utiliza información subrogada que permite hacer una estimación de las emisiones a niveles de mayor detalle. En el ejemplo de las locomotoras se puede utilizar la longitud de las vías en cada estado para obtener un factor de ponderación que dé como resultado las emisiones a nivel estatal. Sin embargo, esta no es la única alternativa; en general existen diversas formas de llevar a cabo la ponderación

Cuadro 3.7 Algunos factores de emisión y datos de actividad usados en el INEM 1999

Categorías de fuentes de área incluidas en el INEM, 1999.	F.E.	Fuente de F. E.	Datos de Actividad	Fuentes de Información	Comentarios
Uso de combustibles destilados: sector industrial	PM 0.24 kg/1000 L	AP42 S1.3 '98	Consumo de combustible (litros)	PEMEX, SENER, SEMARNAT	PM _{2.5} = 0.12PM ₁₀ ; PM ₁₀ = 0.5PM
Uso de combustibles destilados: sector comercial	PM 0.24 kg/1000 L	AP42 S1.3 '98	Consumo de combustible (litros)	PEMEX, SENER, SEMARNAT	PM _{2.5} = 0.42PM ₁₀ ; PM ₁₀ = 0.55PM
Uso de combustibles residuales: sector industrial	PM 4.465 kg/1000 L	AP42 S1.3 '98	Consumo de combustible (litros)	PEMEX, SENER, SEMARNAT	PM _{2.5} = 0.56PM; PM ₁₀ = 0.86PM
Uso de combustibles residuales: sector comercial	PM 1.2 kg/1000 L	AP42 S1.3 '98	Consumo de combustible (litros)	PEMEX, SENER, SEMARNAT	PM _{2.5} = 0.23PM; PM ₁₀ = 0.62PM
Uso de combustibles GLP: sector industrial	PM 0.072 kg/1000 L	AP42 S1.5 '96	Consumo de combustible (litros)	PEMEX, SENER, SEMARNAT	PM _{2.5} = PM; PM ₁₀ = PM
Uso de combustibles GLP: sector comercial	PM 0.0552 kg/1000 L	AP42 S1.5 '96	Consumo de combustible (litros)	PEMEX, SENER, SEMARNAT	PM _{2.5} = PM; PM ₁₀ = PM
Uso de combustibles GLP: sector doméstico	PM 0.0552 kg/1000 L	AP42 S1.5 '96	Consumo de combustible (litros)	PEMEX, SENER, SEMARNAT	PM _{2.5} = PM; PM ₁₀ = PM
Uso de combustibles GLP: sector agrícola	PM 0.0552 kg/1000 L	AP42 S1.5 '96	Consumo de combustible (litros)	PEMEX, SENER, SEMARNAT	PM _{2.5} = PM; PM ₁₀ = PM
Uso de combustibles GN: sector industrial	PM2.5 7.6lb/1e6 scf	AP42 S1.4 '98	Consumo de combustible (litros)	PEMEX, SENER, SEMARNAT	GN del balance de energía, 100 % del sector industrial, 71 % del petroquímico
Uso de combustibles GN: sector comercial	PM2.5 7.6 lb/1e6 scf	AP42 S1.4 '98	Consumo de combustible (litros)	PEMEX, SENER, SEMARNAT	Los sectores comercial y residencial se reportan conjuntamente en el IBNE
Uso de combustibles GN: sector doméstico	PM2.5 7.6 lb/1e6 scf	AP42 S1.4 '98	Consumo de combustible (litros)	PEMEX, SENER, SEMARNAT	Los sectores comercial y residencial se reportan conjuntamente en el IBNE
Uso de combustibles Leña: sector doméstico	PM10 1.5.3 kg/Mg	ref. [13]	Consumo de leña (kg)	FAO	PM _{2.5} = 0.9627 PM ₁₀ , F.E. para estufas convencionales de EUA
Fuentes móviles que no circulan por carreteras: locomotoras	PM2.5 2.19 g/L 1.59 g/L	ref. [14]	Consumo de combustible (litros)	SCT, SENER, PEMEX	Se calcularon las emisiones tanto de patio como en recorrido
Fuentes móviles que no circulan por carreteras: embarcaciones marítimas comerciales	PM2.5 residual 3.02kg/1000L PM2.5 destilado 2.23kg/1000L	ref. [7, 14]	Consumo de combustible (litros)	PEMEX, SENER	

Labranza agrícola	PM ₁₀ 3.45 ^a , 3.09 ^b , 1.84 ^c , 1.66 ^d , 1.57 ^e , 1.37 ^f , 1.15 ^g kg/Mg	ref. [8]	Área total cultivada	SAGARPA	a (sorgo, trigo, cebada, avena), ^b (alfalfa, zacate), ^c (maíz, caña), ^d (frijol, chicharo), ^e (chile), ^f (café, naranja, coco, mango, limón, agave) a (sorgo, trigo, cebada, avena), b(alfalfa, zacate), c (maíz, caña), d (frijol, chicharo), e (chile), f (café, nara nja, coco, mango, limón, agave) (aguacate)
Quemas agrícolas	PM 6.0, 2.9 kg/ Mg	ref. [9]	Área total cultivada	SAGARPA	Trigo, caña (de azúcar) PM _{2.5} = 0.9379PM
Corrales de engorda de ganado	PM ₁₀ 8.62 kg/1000 cabezas-día	ref. [8]	Cantidad de ganado	INEGI, SAGARPA	PM _{2.5} = 0.1142PM ₁₀
Ladrilleras	PM 44.87 kg/ 7614 unidades	ref. [9, 17]	Producción de ladrillos	INE, ETM	PM _{2.5} = 0.9001PM ₁₀
Actividades de construcción	PM ₁₀ 0.941 Mg/ ha-mes	ref. [16]	Permisos de construcción	INEGI	PM _{2.5} = 0.20785PM ₁₀
Venta ambulante de asados	PM _{2.5} 63.81 kg/ 1000 hab	ref. [10, 15]	Población	INEGI	Factores de emisión de un estudio de Cd Juárez
Quema de residuos a cielo abierto	PM _{2.5} 17.4 kg/ Mg	ref. [11]	Cantidad de residuos quemados	ref. [18]	
Incendios forestales	PM 8.5 kg/ Mg	AP42 S13.1 '9.6 ref. [9]	Área quemada por año	INEGI	PM _{2.5} = 0.8544PM ₁₀
Incendios de construcciones	PM _{2.5} 4.94 kg/ Mg	ref. [12]	Datos de vivienda	INEGI	

Fuente [33]

Cuadro 3.8 Fuentes de emisión y relación $PM_{2.5}/PM_{10}$

FUENTES DE EMISIÓN	RELACIÓN $PM_{2.5}/PM_{10}$
Fuentes estacionarias	
Quema de combustibles	0.96
Procesos industriales	0.56
Fuentes fugitivas	
Calles pavimentadas	0.25
Calles no pavimentadas	0.15
Construcción y demolición	0.15
Operaciones agrícolas	0.2
Procesos varios	
Quema de desechos	0.96
Quema de residuos agrícolas	0.93-0.96
Incendios forestales	0.93
Fuentes móviles	
En carretera	0.98

Fuente [19]

res a $10 \mu m$. De hecho, también se han encontrado relaciones entre las PST y las PM_{10} , y entre las PST y las $PM_{2.5}$. Esto se debe a que los procesos de generación siguen rutas determinadas y son por ende reproducibles, lo que puede aprovecharse para determinar la cantidad de $PM_{2.5}$ que se emiten si se conoce la cantidad de PM_{10} o PST emitidas.

Nótese que para procesos de combustión se tienen razones $PM_{2.5}$ a PM_{10} arriba del 98 %, mientras que para fuentes fugitivas la relación es mucho menor. En el cuadro 3.8 se muestran algunas relaciones de este tipo.

Como se mencionó anteriormente, en México se utiliza el método isocinético para el muestreo de PST. Utilizando esta información, las emisiones de $PM_{2.5}$ pueden determinarse con el método de estimación de emisiones mediante la razón $PM_{2.5}/PST$. Este método de estimación es cada vez más utilizado para la determinación de las $PM_{2.5}$.

La Comisión de Recursos del Aire del estado de California (CARB, por sus siglas en inglés) ha desarrollado un programa que contiene una extensa recopilación de datos de donde se pueden obtener las razones $PM_{2.5}/PM_{10}$ para una variedad de procesos [20]. En el cuadro 3.9 se muestran estas relaciones.

mencionada. En este caso, por ejemplo, la longitud de las vías podría no correlacionarse con el tráfico ferroviario y, por lo tanto, la longitud de las vías resultaría en un factor de ponderación no tan exacto. Otra información que podría utilizarse para obtener factores de ponderación es considerar el número de viajes, salidas y llegadas en cada estado.

Razón $PM_{2.5}/PM_{10}$

Otro método de estimación de emisiones de $PM_{2.5}$ consiste en utilizar la razón $PM_{2.5}$ a PM_{10} . Para muchos procesos se ha encontrado que las partículas menores a $2.5 \mu m$ son una fracción relativamente constante de las partículas meno-

Cuadro 3.9 Algunas relaciones de PM_{2.5} y PM₁₀ respecto a las PST, generadas por la CARB

Fuente emisora	Fración PM ₁₀ /PST	Fración PM _{2.5} /PST	Fuente emisora	Fración PM ₁₀ /PST	Fración PM _{2.5} /PST
Material de combustión gaseoso	1	1	Quema-residuos de pino	0.9573	0.8672
Residencial-gas natural	1	1	Chimeneas y hornos de leña	0.935	0.9001
Incineración-combustible gaseoso	1	1	Lijado de madera	0.92	0.885
Horno limitado de O ₂ -acero	1	1	Chimeneas	0.92	0.87
Vehículos diésel-gases de escape	1	0.92	Producción de cemento/bloques de cemento	0.92	0.62
Desgaste de neumáticos	1	0.25	Manufacturación química	0.9	0.89
Combustión sólidos	0.997	0.927	Vehículos de gasolina-no catalíticos	0.9	0.68
Combustión-residuos de madera	0.997	0.927	Quemas forestales controladas	0.88	0.85
Combustión-otros residuos	0.997	0.927	Quema agrícola	0.88	0.85
Fuentes móviles-gasolina	0.994	0.992	Combustión combustible-residual	0.87	0.76
Quemas-cultivos	0.9835	0.9379	Aplicación de pintura-base de agua	0.68	0.62
Quema-hierba/bosque	0.9825	0.9316	Construcción-calles y edificios	0.64	0.37
Quema a cielo abierto	0.9825	0.9316	Refinería del petróleo	0.61	0.555
Quema-residuos	0.9825	0.9316	Calles sin pavimentar	0.61	0.13
Industrias-producción de acero	0.98	0.97	Resuspensión eólica de suelo-calles sin pavimento	0.5943	0.0786
Industrias-fundición de vidrio	0.98	0.963	Resuspensión eólica de suelo-tierras sin cubierta vegetal	0.5937	0.1131
Industrias-producción de asfalto para techos	0.98	0.945	Relleno sanitario-partículas	0.55	0.378
Quema no inscritas-de estructuras	0.98	0.914	Manufactura-asbesto	0.5	0.5
Combustión-destilados del petróleo	0.976	0.967	Resuspensión eólica de suelo-áreas sin pavimento	0.5	0.12
Incineración-combustible líquido	0.976	0.967	Resuspensión eólica de suelo-tierras agrícolas	0.5	0.1
Vehículos catalíticos de gasolina	0.97	0.9	Emisión de partículas-áreas de construcción	0.4893	0.0489
Quema-forestal controlada	0.961	0.8544	Emisión de partículas-manipulación de ganado	0.4818	0.055
Fuentes vehiculares-diésel	0.96	0.937	Partículas-calles pavimentadas	0.46	0.08
Evaporación (pinturas de recubrimiento/a base de aceites)	0.96	0.925	Combustión-carbón y coque	0.4	0.15
Trituradora de piedras	0.1	0.075	Incineración de combustible sólido	0.3	0.2

Fuente [20]

Uso de la razón $PM_{2.5}/PM_{10}$ para estimar emisiones de $PM_{2.5}$ de fuentes de área

A manera de ejemplo, considérese la emisión de partículas por quemado doméstico de leña, que es el proceso que nacionalmente contribuye en mayor grado a las emisiones de $PM_{2.5}$ [23]. El factor de emisión de la quema abierta de leña no se encuentra directamente en las secciones finales del AP-42. En el INEM 1999 se utilizó un factor de emisión obtenido por la EPA para PM_{10} que no se reporta en el AP-42, sino en un estudio sobre quema de madera en estufas: 15.3 kg/t.

Los datos de actividad reportados se basaron en un estudio de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés), y fueron los consumos de leña. Para el estado de Baja California el dato es 8677 t.

Por lo tanto, la emisión de PM_{10} es:

$$E_{PM_{10}} = (8676.9 \text{ t}) (15.3 \text{ kg/t}) = 132\,757 \text{ kg} = 132.8 \text{ t}$$

La razón $PM_{2.5}/PM_{10}$ se obtiene dividiendo las fracciones de PST correspondientes a $PM_{2.5}$ y PM_{10} que se pueden leer de la tabla anterior para la quema de madera:

$$PM_{2.5}/PM_{10} = 0.927/0.997 = 0.9297$$

Por lo tanto, la emisión de $PM_{2.5}$ resulta ser:

$$E_{PM_{2.5}} = (0.9297) (132.8 \text{ t}) = 123.4 \text{ t}$$

En particular, las emisiones de la combustión de leña son la subcategoría de fuentes de área que mayormente contribuyen a las emisiones totales de $PM_{2.5}$. Sin embargo, un estudio relativamente reciente de la misma FAO indica que el consumo de leña posiblemente haya sido sobrestimado hasta en un 30 %, ya que no se consideró que la leña podría tener otros usos, como por ejemplo la producción de carbón vegetal [21].

Herramientas computacionales para la estimación de emisiones (modelos)

El uso de modelos se hace necesario debido a que el funcionamiento de las fuentes de emisión varía ampliamente, pero siguiendo ciertos patrones. Tal es el caso de los vehículos, por ejemplo, en los que se dan variaciones en los patrones de manejo y

de arranque, y que presentan una distribución de tecnologías que, además de variar de un año a otro, también varían de un lugar a otro. Así mismo, se usan modelos también para estimar las emisiones de los vehículos que no circulan por caminos o carreteras, como es el caso de los equipos agrícolas y los equipos de construcción (tractores, excavadoras, etc.); sin embargo, los vehículos de este tipo se consideran frecuentemente fuentes de área y no fuentes móviles.

Entre los modelos más utilizados están el MOBILE, para la estimación de emisiones de fuentes móviles que circulan por carretera, y el NONROAD, para la estimación de emisiones de fuentes móviles que no circulan por carretera. El modelo MOBILE será remplazado en un futuro próximo por el modelo MOVES, que además integrará un modelo para fuentes móviles que no circulan por carretera, con lo que el actual modelo NONROAD será también discontinuado, como se ha mencionado en la *Guía para la estimación de emisiones de fuentes móviles en ciudades mexicanas*. Estos programas se encuentran disponibles en <http://www.epa.gov/otaq/models.htm>. Los modelos PART y MOBTOX ya habían sido integrados en el MOBILE versión 6.2, y por lo tanto quedaron en desuso. Otros modelos de emisiones vehiculares que están disponibles son el International Vehicle Emissions (IVE) Model (no incluye emisión de $PM_{2.5}$ pero sí de PM_{10}) y el modelo OFFROAD2007; sin embargo, estos modelos no son tan utilizados en México para la preparación de inventarios; pueden consultarse en <http://www.issrc.org/ive/> y <http://www.arb.ca.gov/msei/offroad/offroad.htm>, respectivamente.

Debido a que tanto las características de las flotas vehiculares como los patrones de manejo e incluso las condiciones meteorológicas son diferentes en México y en Estados Unidos, los modelos MOBILE, NONROAD y ahora el MOVES no se pueden utilizar directamente en el caso de México. Por ello se han elaborado versiones locales, tanto del MOBILE como del NONROAD, que han resultado en los programas modificados MOBILE-México y NONROAD-México, que pueden consultarse en el sitio web http://www.epa.gov/ttn/catc/cica/atech_e.html.

Los modelos para estimar emisiones de fuentes móviles son utilizados para la realización de inventarios de otros contaminantes, por lo que se recomienda estimar las emisiones de $PM_{2.5}$ al mismo tiempo que se las de los otros contaminantes, siguiendo las guías de preparación de inventarios donde se describe su uso [22].

Como ya se mencionó, en la *Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas* ya se cuenta con la información para alimentar modelos que permiten estimar emisiones de este tipo de fuentes. A continuación se presentan algunas de las más relevantes:

- Temperatura ambiente
- Calidad del combustible
- Altitud
- Estándares de emisión (tecnología)
- Datos de actividad (kilómetros recorridos)
- Datos de población de unidades

Los datos de población pueden obtenerse de los registros de las dependencias encargadas del control vehicular y de tránsito, generalmente administrado por los municipios de los estados. En las ciudades donde se cuente con un programa de verificación vehicular, sea voluntario u obligatorio, sus bases de datos son de extrema utilidad. Estos programas no solo contienen los registros de padrones vehiculares, sino que también pueden proporcionar importante información sobre datos de actividad vehicular. En caso de que no se cuente con esta información, el procedimiento es hacer encuestas a los usuarios de los vehículos.

Cuando los datos de población no se puedan conseguir, es necesario estimarlos mediante la recopilación de datos de remplazo (subrogados). Estos datos deben permitir el desarrollo de los perfiles por categoría, tipo de tecnología y edad de las unidades.

Utilización del NONROAD México

Por lo general, los modelos como el MOBILE-México o el NONROAD-México utilizan archivos en los que se captura la información específica de cada inventario y sirven de entrada para la ejecución del programa. A manera de ejemplo, en la figura 3.3 se muestra una guía rápida para el uso del NONROAD-México (versión 2005), en la que se especifican los campos que se tienen que modificar, de los archivos más relevantes.

Figura 3.3 Guía práctica para la ejecución del modelo NON-ROAD-México (NRM)

1. Clasificación de maquinaria

- 1.1 Precisar la clasificación disponible en el NONROAD-México
- 1.2 Determinar los tipos/modelos/clases de maquinaria realmente usada en México
- 1.3 Ordenar la maquinaria realmente usada de acuerdo con la clasificación del NONROAD-México
Asignar el código SCC a la maquinaria realmente usada y ya clasificada
Calcular el número de horas por año y el número de unidades de cada categoría NRM
Seleccionar el período de cálculo (por ejemplo, año 2005)

2. Modificación de archivos del NONROAD-México

- 2.1 Population Files: *.POP (el asterisco "*" es un carácter genérico que indica la clave de entidad federativa, que consiste en 2 letras)

- a) Modificar el año de estimación del inventario de maquinaria a 2005 solo para los equipos de construcción con código 22700020nn

Campo	Descripción tal como aparece en los archivos *.POP
13 – 16	Year of population estimates

- b) No modificar los campos siguientes:

Campo	Descripción tal como aparece en los archivos *.POP
70-74	Minimum HP range
76-80	Maximum HP range (ranges must match those internal to model)
82-86	average HP in range (if blank model uses midpoint)
88-92	expected useful life (in hours of use)
93-102	flag for scrappage distribution curve (DEFAULT = standard curve)

- c) En el campo siguiente, escribir el número de unidades correspondiente

Campo	Descripción tal como aparece en los archivos *.POP
106-122	population estimate

Es el número de unidades de cada categoría

- 2.2 Activity Files: ACTIVITYMX.DAT (archivo a modificar)

- a) Cambiar solamente las siguientes columnas

Campo	Descripción tal como aparece en los archivos ACTIVITYMX.DAT
97-106	Activity level

El nivel de actividad (activity level) es el número de horas de operación efectiva de una unidad típica durante un año y se deben poner en h/año

3.3 Estimación de emisiones de carbono negro (BC) a partir de las $PM_{2.5}$

Como se mencionó en la sección 2.1, el carbono negro (hollín) se encuentra formando parte de las $PM_{2.5}$, característica que hace de estas últimas un contaminante peligroso para la salud de las personas debido a su elevada toxicidad [1]. Además el BC juega un importante papel en el proceso del cambio climático, ya que absorbe la radiación solar, contribuyendo al calentamiento global del planeta [34]. A diferencia de otros contaminantes, como los gases de efecto invernadero, este puede existir como un conglomerado de partículas en estado sólido-líquido-gaseoso de composición variada [1].

El impacto que causa el BC en la salud de las personas y en los ecosistemas hace que se incremente la relevancia de realizar estudios para estimar la fracción de BC presente en las $PM_{2.5}$.

Según un estudio presentado en el año 2010 al INE, llamado “Temas emergentes en cambio climático: metano y carbono negro, sus posibles cobeneficios y desarrollo de planes de investigación”, la estimación de emisiones de BC en México se realiza mediante dos métodos que a continuación se presentan:

1. *Factores de emisión*: la determinación de los factores de emisión de BC requiere de mediciones con una caracterización precisa de numerosas fuentes de emisión. En México no se han realizado mediciones suficientes para la determinación de factores de emisión de BC, por lo que actualmente para hacer una estimación de las emisiones se requiere de una aproximación con base en resultados de autores de fuentes extranjeras. Por ejemplo, Streets y sus colaboradores compilaron los factores de emisión publicados hasta entonces, y realizaron una extensa campaña de mediciones en las principales fuentes de emisión en China [17]. De esta campaña se desprende la primera metodología de estimación basada en factores de emisión multiplicados por el correspondiente nivel de actividad.
2. *La razón $BC/PM_{2.5}$* : este método utiliza las correlaciones publicadas por Battye, las cuales señalan el porcentaje estimado de BC presente en las $PM_{2.5}$ para diferentes tipos de fuentes emisoras [2]. Dicho porcentaje se aplica a las emisiones de $PM_{2.5}$ reportadas en el respectivo inventario de emisiones,

estimándose de esta forma las emisiones de BC. Como ejemplo se observa en el cuadro 3.10 el porcentaje de BC propuesto por Battye es aplicado a las emisiones de PM_{2.5} reportadas en el INEM del año 1999, obteniendo de esta forma la emisión anual de BC.

Cabe mencionar que la Environmental Protection Agency (EPA) realiza la estimación de emisiones de BC a partir del método señalado anteriormente, es decir, a partir de la razón BC/PM_{2.5}. En el estudio “Report to Congress on Black Carbon” [28] las emisiones de éste contaminante fueron estimadas utilizando la especiación química de las PM_{2.5}. Esta especiación da a conocer la fracción o el porcentaje de BC presente en las PM_{2.5} para diversos tipos de fuentes emisoras, es decir, utiliza el método de correlación de BC/PM_{2.5}, siguiendo la siguiente ecuación:

$$\text{Emisión BC (t)} = \text{Emisión PM}_{2.5} \text{ (t)} \cdot \text{Fracción de BC en PM}_{2.5}$$

En el caso de las fuentes móviles, la estimación de emisiones de carbono negro a partir de emisiones de PM_{2.5} provenientes de fuentes en ruta que utilizan gasolina o diesel se realiza con modelos multimedia, como por ejemplo MOVES o National Mobile Inventory Model (NMIM). Para fuentes fuera de ruta, como embarcaciones pequeñas, vehículos marítimos y aeronaves con turbina a gasolina, sus emisiones de carbono negro se estiman con la ecuación planteada anteriormente [28].

Cuadro 3.10 Emisiones de BC a partir de las correlaciones con las PM_{2.5}

Categoría de fuente	BC/PM _{2.5} (%) [2]		Emisiones PM _{2.5} (Mg/año) [27]	Emisiones BC (Mg/año)	
	Moderado	Alto		Moderado	Alto
Plantas de generación de electricidad	6.7	15.0	62 884.7	4213.3	9432.7
Refinación de petróleo y otros combustibles fósiles	0.3	0.4	13 043.7	39.1	52.2
Manufactura y otros procesos industriales	7.4	13.0	107 560.5	7959.5	13 982.9
Otros servicios	14.0	24.0	14.7	2.1	3.5
Combustión industrial de combustibles	7.4	13.0	11 231.4	831.1	1460.1
Otros usos de combustibles	6.7	15.0	219 218.1	14 687.6	32 882.7
Incendios y quemas	7.2	12.0	53 627.7	3861.2	6435.3
Otras fuentes de área	7.4	15.0	9012.9	667.0	1351.9
Vehículos automotores en circulación	43.0	60.0	18 844.9	8103.3	11 306.9
Fuentes móviles que no circulan por carreteras	43.0	60.0	36 122.9	15 532.8	21 673.7

Fuente [5]

3.4 Recomendaciones generales sobre el uso de los métodos de estimación

Hay una estrecha relación entre la selección de la metodología para la estimación de las emisiones y la selección de las fuentes de información. Hasta ahora, los inventarios se han realizado predominantemente con base en la información disponible, y ello dicta la metodología a utilizar. Sin embargo, dado que históricamente México no cuenta con un buen sistema de recopilación de información ni estadística, frecuentemente se ha tenido que utilizar información subrogada, lo que disminuye la exactitud de los inventarios. Por lo tanto, lo que se recomienda es elegir una metodología, estudiar qué información se requiere y hacer las gestiones necesarias para recabar dicha información.

En el caso de fuentes fijas, que de una u otra manera efectúan procesos bien controlados, y que están sujetas a la normatividad en materia de emisiones de PST, sería fácil extender el cálculo de emisiones de $PM_{2.5}$ mediante el método que utiliza las razones $PM_{2.5}/PST$, aun sin requerir más información de la que ya se pide a través de la COA. Sin embargo, sería conveniente también hacer el cruce de información calculando las emisiones de $PM_{2.5}$ con el método de factores de emisión, con base, por ejemplo, en el consumo anual reportado de combustible, y presentar la estimación de emisiones de acuerdo con los tipos de procesos llevados a cabo.

Dada la escasez de datos de factores de emisión nacionales, es importante que las autoridades ambientales, dentro de sus posibilidades, prefieran usar métodos directos de estimación, como por ejemplo, la medición en fuente, por lo menos hasta haber colectado suficiente información para desarrollar factores de emisión locales, y patrones de operación que permitan el uso de métodos indirectos con menor incertidumbre.

Para las fuentes de área y naturales se pueden utilizar los factores de emisión, y en su caso, las razones $PM_{2.5}/PM_{10}$ o $PM_{2.5}/PST$. Se recomienda analizar los factores de emisión para verificar que las condiciones y los parámetros con los que se están calculando corresponden a las condiciones que se tienen. Se recomienda evitar en lo posible el uso de información subrogada, ya que esto introduce mayor incertidumbre. Solo en el caso de que la información subrogada esté muy completa ayudaría incluso a disminuir la incertidumbre de las estimaciones realizadas con otro tipo de información.

Para el caso de fuentes móviles se recomienda utilizar los modelos adaptados para México, utilizando razones PM_{2.5}/PM₁₀ para estimar las emisiones de PM_{2.5}.

3.5 Referencias

1. Bachmann, J. (2009). Black Carbon: A Science/Policy Primer, Pew Center on Global Climate Change.
2. Battye W., Boyer K., Pace T., (2002) [en línea]. Methods for Improving Global Inventories of Black Carbon and Organic Carbon Particulates. Presentado en la 11a Conferencia Internacional de Inventarios de Emisiones- "Emission Inventories-Partnering for the Future". USA.
 - Consultado en 2010 de: <http://www.epa.gov/ttn/chief/conference/ei11/ghg/battye.pdf>
3. California Environmental Protection Agency. Air Resources Board (1997). "Method 5. Determination of Particulate Matter Emissions from Stationary Sources".
4. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. WGA. (2010). "Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas". En prensa. México.
5. Instituto Nacional de Ecología. (2010). Temas emergentes en cambio climático: metano y carbono negro, sus posibles co-beneficios y desarrollo de planes de investigación. México.
6. Fryrear, D. W., Ali Saleh, J. D., Bilbro, H. M. Schomberg, J. E. Stout, y Zobeck T. M., (1998). "Revised Wind Erosion Equation" Agricultural Research Service. Department of Agriculture. USA.
7. California Air Resource Board, (1997). CARB's Emission Inventory Methodology. Section 7.1.
8. Fryrear, D. W., Sutherland, P. L., Davis, G., Hardeen, G., Dollar, M., (1999). "Wind Erosion Estimates with RWEQ and WEQ". Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting. Purdue University. USA.
9. Hagen, L.J., (1995). Wind Erosion Prediction System, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Manhattan, KS, September.
10. Billings, R., R. Chang y Driver, (2003). Draft Preliminary Methods to Estimate Emissions from Commercial Marine Vessels. ERG, Inc., Morrisville, Carolina del Norte, and U.S. Environmental Protection Agency, Emission Factor and Inven-

- tory Group, Research Triangle Park, Carolina del Norte. Diciembre. Citado en INEM, 1999.
11. Detailed Documentation for Fugitive Dust and Ammonia Emission Inventory Changes for the SJVU APCD Particulate Matter SIP. California Air Resources Board, Planning and Technical Support Division. Abril. Citado en INEM, 1999.
 12. California Emission Inventory Development and Reporting System (CEIDARS) Particulate Matter (PM) Speciation Profiles. Actualizado el 26 de septiembre de 2002. California Air Resources Board. Dirección en Internet: http://www.arb.ca.gov/emisinv/speciate/PMSIZE_09_26_02.xls. Citado en INEM, 1999.
 13. Emissions from Street Vendor Cooking Devices (Charcoal Grilling). EPA-600/R-99-048. Informe preparado para la Oficina de Planeación y Normatividad sobre Calidad del Aire, de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y el Centro de Información sobre Contaminación de Aire (CICA). Junio. Dirección en Internet: <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/mexfr.pdf>. Citado en INEM, 1999.
 14. Open Burning. Volumen III, capítulo 16. Versión final revisada. Emission Inventory Improvement Program, Area Source Committee. Enero. Dirección en Internet: http://www.epa.gov/ttn/chief/eiip/techreport/volume03/iii16_apr2001.pdf. Citado en INEM, 1999.
 15. Structure Fires. Volumen III, capítulo 18. Emission Inventory Improvement Program, Area Source Committee. Enero. Dirección en Internet: http://www.epa.gov/ttn/chief/eiip/techreport/volume03/iii18_apr2001.pdf. Citado en INEM, 1999.
 16. Residential Wood Combustion. Volumen III, capítulo 2. Versión final revisada. Emission Inventory Improvement Program, Area Source Committee. Enero. Dirección en Internet: http://www.epa.gov/ttn/ chief/eiip/techreport/volume03/iii02_apr2001.pdf. Citado en INEM, 1999.
 17. Streets, D. G., S. Gupta, S. T. Waldhoff, M. Q. Wang, T. C. Bond, y Y. Bo (2001), Black carbon emissions in China, *Atmos. Environ.*, 35, 4281 – 4296.
 18. Documentation for Aircraft, Commercial Marine Vessel, Locomotive, and Other Nonroad Components of the National Emissions Inventory. Informe preparado por Eastern Research Group, Inc. (ERG) para U.S. Environmental Protection Agency, Emission Factor and Inventory Group, Morrisville, Carolina del Norte. 7 de octubre. Dirección en Internet: ftp://ftp.epa.gov/pub/EmisInventory/finalnei99ver3/criteria/documentation/nonroad/99nonroad_vol1_oct2003.pdf. Citado en INEM, 1999.

19. Development of an Area Source Emissions Inventory for Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Informe preparado por Eastern Research Group, Inc. (ERG) para la Texas Commission on Environmental Quality (Comisión sobre Calidad del Medio Ambiente de Texas), Sacramento, California. 29 de agosto. Citado en INEM, 1999.
20. Improvement of Specific Emission Factors (BACM Project No. 1). Informe final preparado por el Midwest Research Institute para el South Coast Air Quality Management District, Kansas City, Missouri. 29 de marzo. Citado en INEM, 1999.
21. TCEQ, (2002) Brick Kilns in Ciudad Juárez (Ladrilleras en Ciudad Juárez). Texas Commission on Environmental Quality (Comisión sobre Calidad del Medio Ambiente de Texas). Citado en INEM, 1999.
22. García Gutiérrez, A., A. Rosas Domínguez, H. E. Velasco Saldaña, J. Gómez Perales y G. G. Ramos Rodríguez, 2001. Report of the Situation and the Current Knowledge on the Main Dioxins Sources and Emissions in México. Primer borrador en inglés. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA), Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, México, Distrito Federal. 7 de mayo. Citado en INEM, 1999.
23. Echeverri Londoño C., Maya Vasco G., "Relación entre las Partículas Finas (PM_{2.5}) y Respirables (PM₁₀) en la Ciudad de Medellín". Revista de Ingenierías Universidad de Medellín, Vol. 7, Núm. 12, enero-junio, 2008, pp. 23-42. Universidad de Medellín, Colombia.
24. California Environmental Protection Agency. Air Resources Board. Speciation Profiles Used in ARB Modeling. <http://www.arb.ca.gov/ei/speciate/dnldopt.htm#specprof> fecha de consulta: 2010/11/16.
25. A. Whiteman, J. Broadhead y J. Bahdon. The revision of woodfuel estimates in FAOSTAT. FAO Corporate Document Repository. Forestry Department. <http://www.fao.org/docrep/005/y4450e/y4450e13.htm#TopOfPage> fecha de consulta: 2010/11/16.
26. INE-SEMARNAT (2009), "Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Vehiculares en Ciudades Mexicanas".
27. INE-SEMARNAT. (2006). Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999. INE-SEMARNAT. 377 pp.
28. EPA, Report to Congress on Black Carbon, March 2012. Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act, 2010. Disponible en: <http://www.epa.gov/blackcarbon/>

29. Información compilada del Inventario Nacional de Emisiones de Estados Unidos, 1999.
30. AP-42 (Table 1.3-1. Criteria pollutant emission factors for fuel oil combustion)
31. AP-42 (Table 1.3-4. Cumulative particle size distribution and size-specific emission factors for utility boilers firing residual oil.). La referencia citada en la nota a es de la Sección 1.3 del AP-42.
32. AP-42 (Table 1.3-2. Condensable particulate matter emission factors for oil combustion) Las referencias citadas en las notas e y f son de la sección 1.3 del AP 42.
33. INE-SEMARNAT. (2006). Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999.
34. IPCC (2001), "Tercer Informe de Evaluación, Cambio Climático 2001, La Base Científica". Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
35. INE-SEMARNAT. (2005). Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones.
36. Instituto Tecnológico de Massachussets. 2011. Programa Integral Sobre Contaminación Urbana, Regional y Global: Estudio de Caso de la Ciudad de México. Anexo 13 " Developing a PM2.5 Emissions Inventory Methodology for the Mexico City Metropolitan Area Air Basin.

Recomendaciones finales

4.1. Evaluación de la estimación de emisiones

Entre los aspectos más importantes del proceso de estimación de emisiones, no solo de partículas sino de cualquier otro contaminante, están la calidad y la confiabilidad. La calidad del proceso de estimación está sujeta al uso de fuentes de información y al manejo de los datos y los cálculos para obtener los resultados; la calidad puede ser revisada en cada paso del desarrollo de la estimación a través de procedimientos de control y aseguramiento de calidad. La confiabilidad de los resultados está sujeta a la disponibilidad de información y el uso de supuestos y datos subrogados, entre otras decisiones que se toman durante el proceso de estimación, y se evalúa una vez que se obtienen los resultados. A continuación se comenta un poco más sobre ambos aspectos.

Control y aseguramiento de la calidad

Generalmente, la estimación de emisiones involucra el uso de diversas fuentes de información y el manejo de una gran cantidad de datos. Este volumen de datos hace que se incrementen las probabilidades de cometer algún error en el manejo de los datos o en los cálculos de las emisiones. Por lo tanto, es indispensable implementar, a lo largo del proceso de recopilación de información y estimación de las emisiones, actividades de control y aseguramiento de calidad (ver figura 3.1).

Durante el proceso de estimación de las emisiones es recomendable implementar, entre otras, las siguientes actividades [1]:

- A) Asegurarse de que se está utilizando la mejor fuente de información disponible, tanto para los datos de actividad como para los factores de emisión, ya que, como se mencionó anteriormente, no es común hacer un estimado con base en mediciones directas debido a que no es una práctica obligatoria ni usual para $PM_{2.5}$.

- B) Asegurarse de que los datos de actividad sean representativos del periodo para el cual se realiza la estimación de emisiones.
- C) Asegurarse de que el factor de emisión utilizado es adecuado para el tipo y tamaño de equipo, así como para el tipo, la cantidad y la calidad del combustible utilizado.
- d) Asegurarse, a través de una muestra representativa, de que:
- Los datos han sido bien recopilados, documentados y capturados.
 - Los datos no están fuera de rango, es decir, identificar datos extremos que parezcan estar fuera del rango en el que normalmente se encontrarían los datos en cuestión; esto es útil para verificar la precisión de algunos parámetros, como las medidas de la chimenea de una fuente fija, la tasa de actividad, etc. Por ejemplo, la altura debe ser mayor que el diámetro de la chimenea, o bien, la velocidad del flujo de salida no puede ser mayor que la velocidad del sonido.
 - Las unidades y las conversiones de unidades se han hecho de manera correcta.
 - Los cálculos están bien realizados y los resultados son correctos.

Una vez obtenidos los resultados de la estimación de emisiones, es recomendable implementar, entre otras, las siguientes actividades [1]:

- A) Identificar la magnitud típica de las emisiones de partículas provenientes de diferentes fuentes o para diferentes fracciones de partículas con el fin de detectar alguna inconsistencia o la presencia de valores fuera de contexto; por ejemplo, las emisiones de partículas provenientes de fuentes naturales (como volcanes) son mayores en magnitud que las provenientes de cualquier otro tipo de fuente, como fijas, de área y móviles; así mismo, las emisiones de PM_{10} son, de manera general para todos los tipos de fuentes, mayores que las de $PM_{2.5}$.
- B) Desarrollar estimaciones de emisiones alternas para comparaciones cruzadas; por ejemplo, si se han estimado las emisiones a través del uso de factores de emisión, pero se cuenta con datos de mediciones en fuente, se pueden estimar las emisiones con esa información para determinar si está en los mismos órdenes de magnitud.

- C) Contrastar la estimación de emisiones con respecto a las concentraciones de contaminantes medidas por equipos de monitoreo atmosférico. Este método implica un nivel mayor de complejidad, puesto que requiere de datos de monitoreo que cuenten con cierta calidad y confiabilidad, así como el uso de modelos, ya sea para determinar la contribución de las diversas fuentes cercanas a los equipos de monitoreo (*source apportionment*) y contrastarla con las emisiones estimadas, o bien para modelar la dispersión y concentración a partir de las emisiones estimadas (modelación de la calidad del aire) y contrastarla con los datos obtenidos a través del monitoreo atmosférico.

Durante el proceso de estimación de las emisiones de $PM_{2.5}$

El control y aseguramiento de calidad que se aplica al utilizar un método en particular dependerá de la fuente primaria de las emisiones de PM_{10} o PST. En el caso de que se utilicen los datos de mediciones directas de PST mediante el método isocinético de muestreo, se deberán seguir las pautas recomendadas en la *Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas* [2]. Entre otras, se pueden mencionar las siguientes:

- A) Verificar si las pruebas en la fuente han sido realizadas por laboratorios u organismos certificados por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y con equipo calibrado.
- B) Evaluar si las pruebas fueron realizadas en condiciones representativas de la operación cotidiana del establecimiento, como en días laborables y horarios representativos, para lo cual es posible recurrir a documentación, como: informes originales de laboratorio, certificados de calibración de equipos de medición, hojas de campo y protocolos detallados de muestreo, etc.
- C) Aplicar las actividades de aseguramiento y control de calidad sobre la recopilación de información, verificando que:
- Los domicilios de los establecimientos y sus coordenadas de ubicación se encuentren efectivamente dentro del área geográfica que abarca el inventario.
 - Las claves de identificación asignadas cuenten con la misma nomenclatura pero que no se repitan.
 - Se cuente con los seis dígitos del sistema de codificación SCIAN y que cada uno de los dígitos refleje verazmente el sector, el subsector, la rama, la subrama y la clase de actividad que se realiza en el establecimiento.

- La actividad u operación reportada sea razonable para el tipo de instalación, que no sobrepase las 24 horas en un día o los 365 días en un año.
- El diagrama de funcionamiento sea congruente con los datos de insumos, productos y subproductos.
- Los equipos de combustión y control sean acordes con el producto elaborado.
- El consumo de combustible sea proporcional a la producción anual y a la capacidad de producción instalada.
- La eficiencia del equipo de control de emisiones que se reporta sea congruente con la documentada en la literatura o la reportada por los fabricantes.
- La altura reportada para la chimenea sea mayor que el diámetro ($a > d$).
- No haya confusión en las unidades que se utilizan.
- Detallar las emisiones de fuentes fijas por tipos de procesos industriales.

Cuando las emisiones de PM_{10} o PST se obtienen por factores de emisión, el control y aseguramiento de calidad de la información utilizada en el método de estimación que utiliza la razón $PM_{2.5}/PM_{10}$ sigue los mismos lineamientos que los utilizados para el método de factores de emisión. Las razones $PM_{2.5}/PM_{10}$, que constituyen la otra parte importante del método deben verificarse consultando fuentes independientes, y es necesario asegurarse de que continúan siendo aplicables localmente.

Dado que los modelos para la estimación de emisiones son por naturaleza complejos, y que estos se aplican particularmente para la categoría de fuentes móviles, que es una de las que contribuyen de manera más importante a la emisión de $PM_{2.5}$, es importante establecer un adecuado procedimiento de control y aseguramiento de la calidad. Este procedimiento debe contemplar tres áreas principales

- Datos de entrada
- Parámetros de los programas
- Ejecución de los programas

Los datos de entrada son esencialmente los de actividad vehicular, los de población de vehículos y los otros parámetros referentes a la especificación de condiciones locales, como tipos de combustibles, condiciones meteorológicas, etc. Los parámetros de los programas se refieren a aquellos que no puede modificar el usuario del programa, pero que adecuan los programas a las condiciones locales, en este caso de México. Por ejemplo, las condiciones que se aplican de acuerdo con la tecnolo-

gía de los vehículos, las curvas de deterioro, etc. La ejecución de los programas se refiere al uso adecuado del programa, que tiene que ver en particular con errores humanos.

En cuanto a los datos de entrada, se pueden mencionar los siguientes puntos a considerar:

- Verificar que la población de vehículos sea congruente con la realidad, por ejemplo, mediante el uso de series de tiempo.
- Realizar un cruzamiento de información entre diferentes bases de datos.
- Que los datos de actividad sean congruentes con los consumos de combustible reportados por otras fuentes.
- Que las categorías definidas por los programas correspondan con las clasificaciones locales utilizadas por las fuentes de información.
- En ocasiones será necesario realizar encuestas independientes para verificar la información disponible.

En cuanto a los parámetros de los programas:

- Verificar que se utilicen las versiones correctas de los programas, especialmente cuando se han modificado.
- Que las adaptaciones realizadas contemplen los parámetros que se considere que afectan a los resultados.

En cuanto al uso de los modelos:

- Se recomienda el desarrollo de un protocolo a seguir específicamente para cada inventario.
- Verificar que los datos de entrada que los programas incluyen en los reportes de salida concuerden con los datos que se consideraron de entrada.
- Corroborar los resultados con balances globales de consumo de combustible.

Incertidumbre

El término “incertidumbre” comprende dos tipos de factores en la estimación: el sesgo y la variabilidad [1]. El primero resulta de un error sistemático en el que se incurre durante el proceso de la estimación, derivado de algún dato que no se toma en cuenta, de algún supuesto que se asumió para realizar el cálculo o de algún dato subrogado o predeterminado que se utilizó en la estimación. El sesgo se puede clasificar en dos tipos: el sesgo absoluto, que se define como la diferencia entre el valor

estimado y el verdadero, y el sesgo relativo, el cual es expresado en porcentaje y en el contexto de los inventarios de emisiones es el término más usado. El segundo factor se refiere a la imprecisión de un estimado (define hasta dónde la estimación es persistentemente inexacta), y consiste en la diferencia derivada de un error aleatorio o de las fluctuaciones entre una medida y su valor verdadero. En un inventario, la variabilidad puede resultar de las fluctuaciones temporales o espaciales, por ejemplo, de datos de actividad usados para estimar los factores de emisión.

Entre los problemas a considerar para obtener un correcto valor de la incertidumbre están los siguientes: asumir la independencia de parámetros individuales, como las correlaciones espaciales en las emisiones; las complicaciones inherentes para obtener las estimaciones temporales, espaciales y de especiación de valores promedios de emisiones; y la cantidad limitada de información disponible para la validación de las estimaciones. Todo esto puede provocar que la incertidumbre sea subestimada.

La determinación de la incertidumbre en la estimación de emisiones puede ser un proceso muy complejo si se desea hacerlo en forma cuantitativa, ya que para ello se requieren métodos elevados de estadística; es necesario realizar un análisis del grado de incertidumbre que se necesita determinar, generalmente un porcentaje, para poder escoger el método más apropiado y estimar este parámetro, de preferencia limitándolo a una región geográfica para probar el método seleccionado. Uno de los principales beneficios de la estimación cuantitativa de la incertidumbre es que permite evaluar con más confianza el impacto de una medida de control de emisiones; por ejemplo, si se implementó una medida que tenía potencial para reducir las emisiones en un 50 %, y se sabe que la incertidumbre del inventario es menor al 20 %, se puede asumir que una reducción de emisiones (en comparación con un estimado previo a la implementación de la medida) está asociado con la propia medida de control y no con la propia incertidumbre del estimado. Entre las metodologías cuantitativas para estimar la incertidumbre de las emisiones estimadas sobresalen las siguientes.

Estimación experta y propagación de errores

Estos dos métodos se basan en la suposición de que todos los parámetros de entrada en un inventario son independientes entre sí. También en ambos se asume que los parámetros de emisión obedecen a distribuciones normales o lognormales, y requieren que se estimen las desviaciones estándar y las medias para definir las distribuciones. Sin embargo, son fáciles de implementar y de uso relativamente económico.

Simulación directa

Este método usa la minimización del error, y el Monte Carlo es uno de los modelos más conocidos. Estos modelos pueden estimar directamente el valor central y los intervalos de confianza de estimaciones individuales de emisiones.

Mediciones directas (validación)

Estos métodos de medición en campo de las emisiones son usados para calcular la incertidumbre directamente; también proporcionan información que es utilizada para validar modelos y no solamente estimaciones de emisiones.

Modelación inversa de la calidad del aire

Los modelos de este tipo estiman las emisiones que podrían ser requeridas para producir las concentraciones medidas por los equipos de monitoreo y, por lo tanto, pueden generar medidas directas de incertidumbre. Sin embargo, requieren modelaciones muy sofisticadas y avanzadas, además de estadísticas y análisis de las emisiones.

Los métodos más frecuentemente utilizados, por su naturaleza más sencilla, son los cualitativos y los mixtos, es decir, que cuentan con algunos componentes cualitativos y otros cuantitativos. Los métodos cualitativos se basan en documentar y analizar el posible impacto de todas y cada una de las fuentes de incertidumbre que se detectan a lo largo del proceso de estimación de emisiones. Entre las metodologías mixtas para calcular la incertidumbre de las emisiones estimadas sobresale la siguiente:

Índice de calidad de los datos

En esta metodología, los índices son designados a cada parámetro a calificar, y pueden ser valores numéricos.

Algunos ejemplos de métodos mixtos que utilizan un índice de calidad de los datos se incluyen tanto en la *Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas* como en la *Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas* [2, 3].

Las fuentes disponibles para realizar el análisis son uno de los principales factores para la selección de la metodología más apropiada para determinar la incertidum-

bre. Se recomienda la aplicación de la metodología computacional más sofisticada si hay información detallada de las emisiones y si los parámetros de emisión son derivados de mediciones de campo; pero, si no es así, se recomienda usar la metodología más sencilla, por la limitación de la información con la que debe ser alimentada dicha metodología.

4.2 Manejo de información y presentación de resultados

Por el volumen de la información que se utiliza al realizar una estimación de emisiones, se recomienda que el manejo de dicha información sea a través de una computadora, lo que además facilitará el análisis y la validación de los datos y, por supuesto, permitirá una mejor organización de la información. La selección del sistema de manejo de información dependerá de muchos factores, como el tamaño de las bases de datos, la complejidad de los cálculos de las emisiones, así como del número de cálculos a realizar, la variedad de resúmenes tabulares a generar, la habilidad del personal involucrado en el manejo de las bases de datos y el tiempo con el que se cuenta para realizar la estimación.

Así mismo, uno de los pasos finales del desarrollo de una estimación de emisiones es el almacenamiento, de preferencia electrónico, de la información generada y los datos colectados a través de todo su desarrollo, sobre todo para que sirva como base para el desarrollo de las actualizaciones subsecuentes, y para permitir que otras personas puedan reproducir y analizar los resultados.

El último paso en el desarrollo de una estimación de emisiones es la elaboración de un reporte final y la presentación de los resultados, sin olvidar las metodologías, los datos y las suposiciones que se usaron para su desarrollo. Esto se ha documentado ya ampliamente en las guías metodológicas para la estimación de emisiones vehiculares y de fuentes móviles (ver [1, 2]); sin embargo, es importante resaltar que para lograr una mayor comprensión y una mejor interpretación de la información generada a través de la estimación de emisiones, se debe hacer un adecuado y cuidadoso uso de las tablas y los gráficos que soportan la presentación de los resultados.

Específicamente, para el caso de las emisiones de $PM_{2.5}$ se recomienda presentar los resultados tanto en forma tabular como de manera gráfica, generalmente acompañados por una o varias notas al pie para aclarar algún punto o precisar alguna información.

Uso de cuadros

Los cuadros o tablas son importantes para resumir los datos obtenidos durante la estimación de emisiones, sobre todo cuando se van a poner a disposición del público en general. La información que se puede presentar en cuadros incluye:

1. Total nacional, estatal o municipal de las emisiones
2. Emisiones por estado o por municipio
3. Emisiones por sector
4. Emisiones por categoría de fuente
5. Emisiones por subcategoría de fuente, por ejemplo, desglosar las emisiones de acuerdo con el tipo de vehículo. Este tipo de desglose ayudará a identificar a los mayores contribuyentes.
6. Desglose de las categorías de fuentes que se incluyeron en la estimación.

Los cuadros también ayudan a tener los totales de emisiones, así como los totales parciales por estado, municipio, sector o categoría de fuente, entre otros datos.

Uso de figuras

Los gráficos o figuras son un excelente apoyo visual para identificar de manera más rápida la información que se desea presentar, por ejemplo, los mayores contribuyentes por fuente o por sector. La mayor parte de los datos que pueden ser presentados en cuadros pueden graficarse, y debe cuidarse que la presentación gráfica sea la adecuada y que realmente transmita el mensaje o información que se desea dar a conocer.

Por ejemplo, en la figura 4.1 se muestra un ejemplo de una gráfica donde se presentan datos de emisiones de tres contaminantes criterio por estado (con datos ficticios); sin embargo, debido a que las emisiones de uno de los contaminantes sobrepasan en gran medida las emisiones de los otros dos, y a que las gráficas de pastel están muy pequeñas, solo se observa que la emisión de CO es muy grande en comparación con las emisiones de NOx y PM, pero no podemos extraer mayor información de este gráfico con respecto a estos dos últimos contaminantes. Igualmente, en

Figura 4.1 Ejemplo de un gráfico mal presentado



Nota: ejemplo con datos no reales

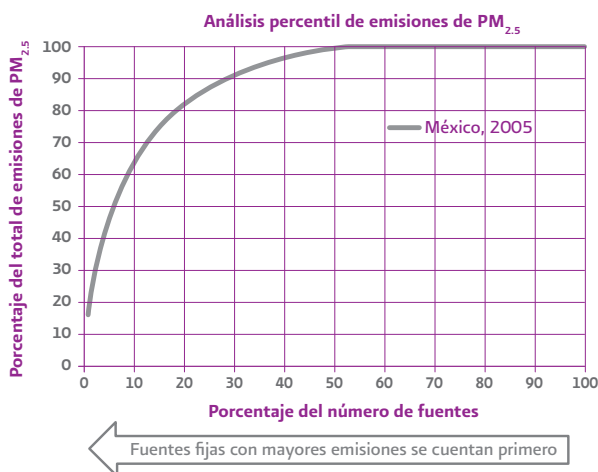
esta misma figura se observa que en la leyenda no se especifica si se trata de PST, PM_{10} , $PM_{2.5}$ u otra fracción de las partículas suspendidas, por lo que aun cuando se pudiera apreciar la presencia de este contaminante en las gráficas de pastel, no se sabría exactamente a qué tipo de partículas corresponden las emisiones.

Aunado a lo anterior, es importante considerar que no se recomienda presentar gráficas donde se sumen las emisiones de diversos contaminantes, ya que si bien los datos de emisión de cada contaminante nos indican la cantidad absoluta que entra a formar parte de la composición de la atmósfera, este dato no nos revela la importancia relativa de dicho contaminante. Esencialmente, la preocupación de la liberación de sustancias a la atmósfera está en función del daño o efecto que esa sustancia pueda tener, ya sea en la salud de la población, en los materiales, en el medioambiente local o en el medioambiente global. Por lo tanto, no es solo la masa o cantidad de contaminantes emitida lo que es relevante de cada sustancia y, en consecuencia, aunque cuenten con las mismas unidades, no es recomendable sumar las emisiones de diversos contaminantes. Por ejemplo, si se han estimado las emisiones de PST, PM_{10} y $PM_{2.5}$, lo recomendable es presentarlas por separado, y no sumarlas y reportarlas como PM.

Por otro lado, los gráficos nos ayudan a analizar la información generada en un inventario y, para ello, estadísticas como máximas, mínimas, modas y percentiles son muy útiles durante el análisis. Por ejemplo, la figura 4.2 muestra (con datos ficticios) que para el año 2005 el 30 % de las fuentes fijas analizadas generan el 90 % de las emisiones.

Finalmente, a pesar de las diferencias en la composición de las partículas $PM_{2.5}$, en los perfiles de exposición, en las fuentes y en los diferentes grados de susceptibilidad de la población, como resultado de la evidencia científica generada en los últimos años es evidente

Figura 4.2 Ejemplo de una gráfica que utiliza percentiles



Nota: ejemplo con datos no reales

que hay una relación directa entre la presencia de partículas $PM_{2.5}$ y casos de mortalidad y morbilidad. Por ello, es urgente que se apliquen estrategias de control para disminuir las emisiones de partículas y sus concentraciones en el ambiente, y los inventarios de emisiones son una de las herramientas primordiales para determinar e identificar las fuentes que contribuyen a la generación de este contaminante y que deben ser sujetas a dichas estrategias de control.

En la presente guía hemos discutido métodos para estimar emisiones primarias de $PM_{2.5}$; sin embargo, no hay que perder de vista que existen partículas de origen secundario. De estas últimas, es importante estimar sus emisiones a partir de sus precursores, pues para tomar decisiones más precisas sobre estrategias para la reducción de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la atmósfera es necesario conocer el comportamiento de las fuentes primarias y secundarias de emisión.

4.3 Referencias

1. Radian Corporation (1996), "Implementation Plan for Mexico Emissions Inventory Methodology". Version 2.0. Document 670-017-06-01.
2. INE-SEMARNAT (2009), "Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Vehiculares en Ciudades Mexicanas".
3. INE-SEMARNAT (Por Publicar), "Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones de Fuentes Fijas".

Glosario

Balance radiativo	Balance entre la energía absorbida y la energía irradiada por la Tierra que puede ser alterado por la reflexión de las nubes, la absorción de gases (gases efecto invernadero) y otros fenómenos.
Erosionabilidad	La erosionabilidad del suelo es un parámetro que depende de la cantidad de agregados de suelo de tamaño tal que puedan ser removidos por el viento.
Eutroficación	Proceso, natural o provocado, por el que un lago experimenta un progresivo aumento de nutrientes que causan un enriquecimiento cada vez mayor de algas y otras plantas acuáticas.
Fuentes geogénicas	Todas aquellas de origen geológico, como los volcanes y las que tienen que ver con el suelo.
Fuentes móviles	Todas las fuentes motorizadas con autorización para circular por caminos públicos, como motocicletas, vehículos de pasajeros, camiones y autobuses.
Morbilidad	Cantidad de personas o individuos considerados enfermos o víctimas de una enfermedad en un espacio y tiempo determinados.
Mortalidad	Tasa de defunciones o número de defunciones en un grupo determinado de personas en un periodo determinado.
Partículas condensables	Incluyen material en estado gaseoso que es colectado en trampas o tubos impactores del tren de muestreo (método 5 de la EPA).
Partículas filtrables	Incluye material sólido con un tamaño mayor al establecido por el poro de un filtro y que es colectado por ese filtro en el tren de muestreo (método 5 de la EPA).
Sibilancia	El sonido que hace el aire al pasar por las vías respiratorias congestionadas, se utiliza como una señal clínica de problemas respiratorios.

Guía metodológica para la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$

El tiraje consta de 300 ejemplares y se terminó de imprimir en el mes de noviembre de 2012, en los talleres de Punto Final Graficos S.A. de C.V. ubicados en Alfredo Nobel 37, Col. Puente de Vigas Tlalnepantla CP 57090, Estado de México.



**GOBIERNO
FEDERAL**

SEMARNAT

La población expuesta continuamente a las partículas finas ($PM_{2.5}$) tiene importantes efectos en la salud, como el aumento en las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y en las tasas de mortalidad. Estas partículas por sus características físicas y químicas son altamente tóxicas y son capaces de penetrar profundamente en los pulmones y depositarse en los alvéolos e inclusive llegar al torrente sanguíneo.

El primer paso para atender este problema, desde el punto de vista de la gestión de la calidad del aire, es contar con un inventario de emisiones de $PM_{2.5}$ que permita identificar las principales fuentes de generación de emisiones de este contaminante, y en consecuencia diseñar medidas para su control.

En vista de lo anterior, la presente “Guía metodológica para la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$ ” ofrece información general sobre la importancia de este contaminante en cuanto a sus efectos en la salud humana y en el ambiente, así como las metodologías comúnmente empleadas para la estimación de sus emisiones.

Este es uno más de los productos que el INECC desarrolla sobre el tema del fortalecimiento de capacidades para la elaboración de inventarios de emisiones de contaminantes del aire, y que forma parte del esfuerzo continuo que realiza la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Para consultas diríjase a la dirección de internet <http://ine.gob.mx/dica>.

www.semarnat.gob.mx

www.ine.gob.mx