

Valoración económica de los beneficios a la salud de la población que se alcanzarían por la reducción de las $PM_{2.5}$ en tres zonas metropolitanas mexicanas



**Instituto Nacional de Ecología
y Cambio Climático**

2014

Directorio

Dra. María Amparo Martínez Arroyo. *Directora General del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC*

Dr. Víctor Hugo Páramo Figueroa. *Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental, INECC*

Ing. Sergio Zirath Hernández Villaseñor. *Director de Investigación en Monitoreo Atmosférico y Caracterización Analítica de Contaminantes, INECC*

Elaboración

M. en I. María Tania López Villegas. *Subdirectora de Estudios Estratégicos de la Calidad del Aire, INECC*

Ing. Ingrid Katherine Perez Rivas. *Jefa de Departamento de Estudios sobre Emisiones por Fuentes Estacionarias, INECC*

Agradecemos sus valiosos comentarios a los siguientes especialistas, durante la elaboración de este trabajo:

Dra. Leonora Rojas Bracho. *Consultora de medio ambiente*

M. en C. Verónica Garibay Bravo. *Consultora de medio ambiente*

Dr. Carlos Santos-Burgoa. *Director de Enfermedades No Transmisibles y Salud Mental y Jefe de la Unidad de Factores de Riesgo de la Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud*

Dr. Horacio Riojas Rodríguez. *Director de Salud Ambiental del Centro de Investigación en Salud Poblacional, Instituto Nacional de Salud Pública*

Dra. Gretchen Stevens. *Oficial Técnico del Departamento de Estadísticas de Salud y Sistemas de Información, Organización Mundial de la Salud*

Dra. Katherine Blumberg. *Directora de los Programas de Salud y Clima y líder en México, Consejo Internacional para el Transporte Limpio (ICCT en inglés)*

M. en C. Iván Islas Cortés. *Director de Economía Ambiental, INECC*

D.R. © Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Periférico Sur 5000. Col. Insurgentes Cuicuilco

C.P. 04530. Delegación Coyoacán, México, D.F.

<http://www.inecc.gob.mx/>

Siglas y acrónimos

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Microgramos por metro cúbico
AMM	Área Metropolitana de Monterrey
D. F.	Distrito Federal
Edo. Méx.	Estado de México
EPOC	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas
FER	Funciones exposición-respuesta
mdp	Millones de pesos
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OMS	Organización Mundial de la Salud
PIB	Producto Interno Bruto
PM_{10}	Partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros
$PM_{2.5}$	Partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros
SEMADES	Secretaría de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable del Gobierno del estado de Jalisco
SMA-GNL	Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del estado de Nuevo León
SPMARN-GNL	Subsecretaría de Protección al Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno del estado de Nuevo León
ZM	Zona Metropolitana
ZMG	Zona Metropolitana de Guadalajara
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
h	Horas

Resumen ejecutivo

En las zonas metropolitanas del Valle de México, Monterrey y Guadalajara, la concentración de ozono y de partículas suspendidas rebasa continuamente los límites establecidos en las normas mexicanas e internacionales para proteger la salud de la población. En estas tres metrópolis habita más de una cuarta parte de la población del país (28.7 millones de habitantes), que está expuesta a los riesgos que representa respirar aire contaminado. De acuerdo con datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) reportados para 2010, las partículas suspendidas son responsables de más de 3.2 millones de muertes prematuras en todo el mundo. Las partículas finas, con un diámetro menor o igual a 2.5 micras (PM_{2.5}), ocupan el noveno lugar en la lista de los factores de riesgo asociados con los índices de mortalidad a nivel mundial, principalmente por enfermedades cardiovasculares (Lim *et al.*, 2012). Es necesario, entonces, implementar acciones de política pública para reducir las emisiones y los precursores de estos contaminantes a la atmósfera y, por ende, los impactos negativos que causan en la población.

Las acciones de política involucran costos y beneficios. Por lo tanto, las evaluaciones económicas de los impactos de la contaminación atmosférica son un elemento fundamental en la toma de decisiones de la política ambiental en varios países. Por ejemplo, en Estados Unidos de América, la Oficina de Gestión y Presupuesto (OMB, por sus siglas en inglés) requiere que la Agencia de Protección Ambiental realice este tipo de evaluaciones sobre las normas y programas que propone desde hace más de veinte años. Así, pondera los costos y los beneficios y justifica sus acciones. En México, esta práctica es incipiente, pero se cuenta con un muy buen ejemplo: el análisis costo beneficio de la Norma Oficial Mexicana sobre la calidad de los combustibles (NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005). Este estudio, realizado por el Instituto Nacional de Ecología, hoy Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), fue fundamental para que se autorizara a la empresa Petróleos Mexicanos (PEMEX) el ejercicio del presupuesto federal necesario para reducir el contenido de azufre en los combustibles vehiculares, pues los resultados mostraron que los beneficios en la salud de la aplicación de la norma superaban en 2.3 veces los costos de su implementación (INE, 2008).

El INECC continúa evaluando los impactos económicos de intervenciones ambientales y, durante 2014, evaluó los impactos en la salud (es decir, muertes prematuras),¹ para el año base 2010, que se evitarían si se cumplieran los límites marcados en las normas mexicanas e internacionales de calidad del aire en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey. Asimismo, se calculó el valor monetario de estos casos evitados, de manera que puedan ser comparados con los costos de cumplir con estas normas. Es oportuno mencionar que las estimaciones de los impactos en la salud se realizaron para el año base 2010 porque en este año se dispuso de la información más desagregada de la población, esto es, a nivel de Área Geoestadística Básica (AGEB) del más reciente Censo General de Población y Vivienda

¹Para efectos de este documento las muertes prematuras o evitables son aquéllas que podrían evitarse en el año de estudio (2010) si se cumpliera con la normatividad nacional o internacional, de acuerdo con los escenarios considerados en este análisis.

de México, realizado en ese mismo año. La metodología empleada para la estimación de los impactos en la salud se basó en el análisis de riesgos ambientales (INE, 2010). En el procedimiento de monetización de los casos de mortalidad prematura se utilizó el valor estadístico de una vida (VEV) ajustado por ingreso para México, de estudios de disponibilidad a pagar de Estados Unidos de América (Kochi, 2006).

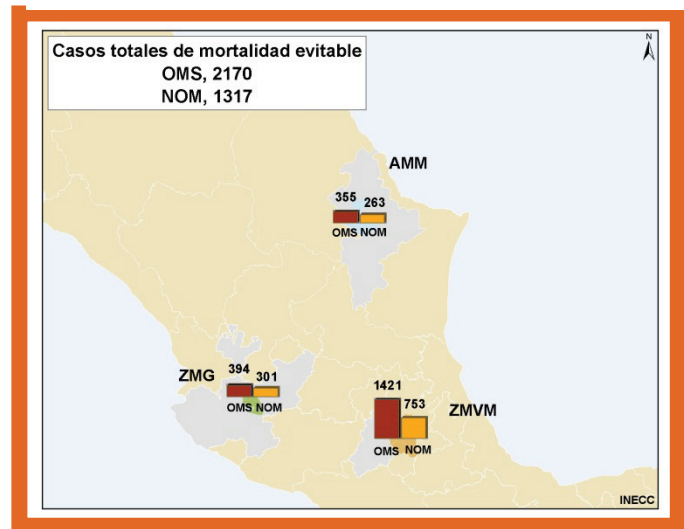
Reducir la contaminación ahorra costos sociales

Los resultados de este estudio muestran que si las concentraciones de partículas finas (PM_{2.5}) en estas ciudades se mantuvieran dentro de los límites recomendados por la OMS, solamente durante 2010 se evitarían impactos con un valor económico de \$45 mil millones de pesos.² Ahora bien, si las concentraciones de partículas finas estuvieran por debajo de los límites de la normatividad mexicana (que son más laxos), se tendrían también cuantiosos beneficios económicos (27 mil millones de pesos), aunque menores que en el caso anterior. La mayor parte de los casos evitados se dan en el Valle de México, principalmente por la cantidad de población que alberga (2.4 veces la población de las ZM de Guadalajara y Monterrey juntas), si bien los beneficios en Guadalajara y Monterrey sobrepasan los 12 mil millones de pesos anuales.

Reducir la contaminación salva vidas

De acuerdo con los estudios epidemiológicos más robustos sobre contaminación del aire y salud, al reducir la concentración de PM_{2.5} en el aire se reducen las muertes ocasionadas por, al menos, tres padecimientos específicos: enfermedades cardiovasculares, cáncer de pulmón y enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (EPOC). En este estudio se encontró que, de cumplirse con las recomendaciones de la OMS, se evitarían, en estas tres ciudades, un total de 2,170 muertes prematuras, en comparación con las 1,317 que se evitarían de cumplir con la norma oficial mexicana respectiva, en 2010.

Figura 1. Casos de mortalidad evitable en las tres metrópolis, 2010



Reducir la contaminación requiere acciones de política contundentes

Los montos calculados muestran que los beneficios económicos de reducir las concentraciones de PM_{2.5} son cuantiosos. Los 45 mil millones de pesos que se ahorrarían si se cumplieran los límites de la OMS equivalen a la mitad del gasto programado en salud del gobierno federal en 2010. Ahora bien, aún cuando no fuera posible reducir la contaminación a estos niveles, los beneficios económicos de lograr el

² A precios de 2010.

cumplimiento de la norma oficial mexicana equivalen al 60% del gasto programado en medio ambiente para 2010. Con todo, estas estimaciones pueden considerarse conservadoras, pues si se incluyeran los costos que se evitarían por el tratamiento de enfermedades crónicas (como el cáncer de pulmón) y agudas (como el asma), y la pérdida de la productividad por malestares respiratorios, los beneficios serían mayores. Adicionalmente, la reducción de las concentraciones de las PM_{2.5} tendría un impacto en la mitigación del calentamiento global dado que el *carbono negro* (*black carbon* en inglés) es un componente importante de estas partículas.

Es indispensable redoblar los esfuerzos gubernamentales y de la ciudadanía para reducir la mortalidad que causa la contaminación atmosférica en nuestro país. Este documento incluye una descripción completa de los insumos, métodos y resultados de este estudio, con el objeto de que se utilicen para justificar la implementación de programas, normas y acciones de política pública encaminados a mejorar la calidad del aire en las tres zonas metropolitanas más pobladas del país. Los costos de estas intervenciones son, seguramente cuantiosos, pero como puede verse en los resultados, los beneficios económicos son indiscutibles.

Contenido

<i>Siglas y acrónimos</i>	3
<i>Resumen ejecutivo</i>	4
Reducir la contaminación ahorra costos sociales.....	5
Reducir la contaminación salva vidas.....	5
Reducir la contaminación requiere acciones de política contundentes.....	5
<i>Contenido</i>	7
<i>Lista de cuadros</i>	9
<i>Lista de figuras</i>	10
<i>Introducción</i>	11
<i>Generalidades de las tres zonas metropolitanas analizadas</i>	14
ZM del Valle de México.....	14
ZM de Guadalajara.....	15
AM de Monterrey.....	16
<i>Tendencias de las $PM_{2.5}$ y PM_{10} en las tres zonas metropolitanas (2004-2011)</i>	17
<i>Escenarios de reducción de concentraciones</i>	20
<i>Beneficios en la salud humana y su valoración</i>	21
Beneficio económico.....	23
Impactos en la mortalidad.....	23
<i>Resultados</i>	24
<i>Recomendaciones</i>	27
ZMVM.....	28
ZMG.....	28
AMM.....	29
<i>Limitaciones del estudio</i>	31
Selección de la función exposición-respuesta (FER).....	31
Evaluación de la exposición.....	31

Cuantificación de las concentraciones de PM _{2.5}	31
Distribución espacial de las PM _{2.5}	32
Datos de salud de las poblaciones	32
Valoración económica.....	33
Referencias	34
Anexos metodológicos	36
Generalidades de las partículas suspendidas	37
Descripción de las etapas metodológicas.....	38
Aplicación del modelo BenMAP	38
Identificación de los impactos de las PM _{2.5}	38
Selección de la función exposición-respuesta (FER).....	39
Evaluación de la exposición	40
Población y características	44
Datos de salud	45
Caracterización del impacto.....	45
Valoración económica de los impactos	45
Días en los que se rebasa el límite de 24 h de la NOM	47
Días por arriba del límite de 24 h.....	47
Normatividad nacional e internacional sobre las PM_{2.5}.....	48
Municipios que conforman la ZMVM.....	49
Referencias.....	51

Lista de cuadros

Cuadro 1. Datos generales de la ZMVM para 2010.....	14
Cuadro 2. Datos generales de la ZMG para 2010.....	15
Cuadro 3. Datos generales de la AMM para 2010	16
Cuadro 4. Escenarios de reducción de las concentraciones de $PM_{2.5}$	20
Cuadro 5. Impactos en la salud estimados en la población de las tres ZM.....	21
Cuadro 6. Beneficios monetarios bajo los dos escenarios analizados, en pesos de 2010.....	23
Cuadro 7. Número total de casos de mortalidad evitable en las tres zonas metropolitanas, 2010.....	23
Cuadro 8. Tasas de mortalidad cardiovascular sustitutas.....	32
Cuadro 9. Impactos en la salud, intervalo de edad de la población, riesgos relativos y referencias.....	39
Cuadro 10. Impactos estimados, edad de población afectada y claves CIE-10	44
Cuadro 11. Población mayor de 30 años en cada zona metropolitana	44
Cuadro 12. Población en cada zona metropolitana, su suma y su fracción respecto a la población total	44
Cuadro 13. Límites anuales y de 24 horas para las $PM_{2.5}$ en diferentes países del mundo.....	48
Cuadro 14. Municipios que conforma la ZMVM	49

Lista de figuras

Figura 1. Casos de mortalidad evitable en las tres metrópolis, 2010	5
Figura 2. Cumplimiento del límite anual de PM_{10}	17
Figura 3. Cumplimiento del límite anual de $PM_{2.5}$	17
Figura 4. Concentraciones anuales de $PM_{2.5}$ en ZMVM, 2010	18
Figura 5. Concentraciones anuales de $PM_{2.5}$ en ZMG, 2010.....	18
Figura 6. Concentraciones anuales de $PM_{2.5}$ en AMM, 2010	19
Figura 7. Reducciones de las concentraciones de las $PM_{2.5}$ requeridas en las zonas pobladas del Valle de México	24
Figura 8. Reducciones de las concentraciones de las $PM_{2.5}$ requeridas en las zonas pobladas de la ZMG ...	25
Figura 9. Reducciones de las concentraciones de las $PM_{2.5}$ requeridas en las zonas pobladas de la AMM ..	25
Figura 10. Las $PM_{2.5}$ son entre 20 y 28 veces más pequeñas que el grosor de un cabello humano	37
Figura 11. Metodología general para la estimación de los impactos en la salud	38
Figura 12. Ubicación de las estaciones que miden PM_{10} y $PM_{2.5}$ en Valle de México.....	40
Figura 13. Ubicación de las estaciones que miden PM_{10} y $PM_{2.5}$ en Guadalajara	41
Figura 14. Ubicación de las estaciones que miden PM_{10} y $PM_{2.5}$ en Monterrey	41
Figura 15. Distribución espacial de las concentraciones base en la ZMVM.....	42
Figura 16. Distribución espacial de las concentraciones base en la ZMG	42
Figura 17. Distribución espacial de las concentraciones base en la AMM.....	43
Figura 18. Cálculo de los casos de mortalidad evitable	45
Figura 19. Cálculo de los beneficios monetarios.....	46
Figura 20. Ajuste del valor de una vida estadística para México	46
Figura 21. Número de días en los que se rebasa el límite de 24 h de la NOM de PM_{10}	47
Figura 22. Número de días en los que se rebasa el límite de 24 h de la NOM de $PM_{2.5}$	47

Figura 23. Límites anuales y de 24 horas para las PM_{2.5} en diferentes países del mundo

48



Introducción

Los efectos adversos de las PM₁₀ y de las PM_{2.5} se han encontrado sin identificar un umbral en su concentración. Los impactos adversos se han documentado con estudios realizados no sólo en ciudades con niveles que rebasan frecuentemente los valores de las normas de calidad del aire, sino también, en ciudades relativamente limpias, con niveles de partículas que no rebasan los límites permisibles establecidos en dichas normas. De hecho, lo más cercano a un umbral es el intervalo de “riesgo mínimo”, que sugieren algunos expertos se encuentra entre 6 y 9 µg/m³ (Lim *et al.*, 2012), y que corresponde a concentraciones por debajo de los valores de las normas anuales de calidad del aire de todos los países, incluida la recomendación de la OMS.

En México durante 2008 se estimaron 14,734 muertes prematuras a causa de la exposición a la contaminación atmosférica en exteriores (OMS, 2013). Estas muertes prematuras se traducen en costos significativos que absorbe la sociedad mexicana. Es por ello indispensable que el gobierno federal y los gobiernos locales tomen acciones de política pública para abatir las concentraciones de partículas finas en las localidades en donde se rebasan continuamente los límites establecidos en las normas mexicanas y en las recomendaciones de la OMS (OMS, 2006). Esto con el fin de reducir la carga de riesgo de la mortalidad y morbilidad de la población expuesta y garantizar a sus habitantes el derecho de tener un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar, cuyo derecho humano se consagra en el artículo 4º de la Constitución de México.

Las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey, evaluadas en este estudio, constituyen los principales centros económicos del país en donde se genera la mayor parte de la riqueza. En conjunto, el Distrito Federal y los estados de México, Jalisco y Nuevo León aportan alrededor del 41% del producto interno bruto nacional (INEGI, 2013). En consecuencia, en estas zonas metropolitanas se desarrolla una enorme cantidad de actividades económicas que comprenden, principalmente, a la comercialización de bienes y servicios, y en segundo término a las actividades industriales especialmente en los sectores de la construcción, alimentario y de los derivados del petróleo.

Desafortunadamente, esta intensidad económica se ha vinculado con el aumento de emisiones contaminantes que deterioran la calidad del aire de estos centros de población. Alrededor de 28.7 millones de habitantes viven en estas tres zonas metropolitanas, lo que representa aproximadamente 26% de la población nacional (INEGI, 2013). El aumento de la población y de las emisiones de contaminantes del aire han traído como consecuencia impactos importantes en la salud de la población como el aumento de la mortalidad prematura causada por las enfermedades cardiovasculares y respiratorias, relacionadas con la

exposición crónica a las partículas suspendidas. Estos impactos tienen, a su vez efectos, económicos que son absorbidos por los gobiernos, y en último término por la sociedad en su conjunto.

La exposición continua a concentraciones de las partículas suspendidas con un diámetro menor a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}), que rebasan el umbral de “riesgo mínimo” de efectos a la salud, se ha generalizado en muchos centros urbanos del mundo y nuestro país no es la excepción. Desde 2003, cuando se iniciaron las primeras mediciones de este contaminante en la ciudad de México, se advirtió que sus concentraciones ambientales rebasaban los valores normados, tanto el límite anual como el de 24 h. Esto mismo se ha observado en el caso de las concentraciones presentes en el aire ambiente de Guadalajara y Monterrey para los años en los que existen datos disponibles y suficientes. Asimismo, las concentraciones de partículas con un diámetro menor a 10 microgramos (PM₁₀) en estas tres zonas metropolitanas han estado continuamente por encima del límite anual para este contaminante en el periodo 2004-2011, y dado que las PM_{2.5} son aproximadamente la mitad de las PM₁₀, resulta probable que los niveles ambientales de las PM_{2.5} también hayan estado continuamente rebasando el valor anual normado y por ende el umbral de “riesgo mínimo”.

Es indudable que la exposición prolongada a concentraciones ambientales de PM_{2.5} por arriba del umbral de “riesgo mínimo” causa efectos importantes en la salud humana de la población. La evidencia internacional señala efectos en el incremento de la mortalidad prematura (McDonnell *et al.*, 2000; Pope *et al.*, 1995b; Pope *et al.*, 2002; Pope *et al.*, 2004 y Krewski *et al.*, 2009, citados en INE-SEMARNAT, 2012); y en la morbilidad, especialmente por enfermedades respiratorias (Kunzli *et al.*, 2000; Pekkanen *et al.*, 2002; Peters *et al.*, 2000, citados en INE-SEMARNAT, 2012). La evidencia que tenemos para México es consistente y confirma, a nivel local, los hallazgos internacionales, en cuanto a los impactos de las PM en la salud. Así, la certidumbre de dicha asociación se hace más robusta con el estudio ESCALA (Estudio de Contaminación del Aire y Salud en Latinoamérica), esfuerzo que incluyó el análisis de las series de tiempo de mortalidad y contaminación (datos diarios de mortalidad y concentraciones de partículas suspendidas y ozono), para tres ciudades de México (Ciudad de México, Toluca y Monterrey), y seis ciudades de Brasil y Chile (HEI, 2012).

El objetivo del presente estudio es cuantificar estadísticamente las muertes que se podrían evitar si se redujeran las concentraciones ambientales anuales de PM_{2.5} a los valores de 15 µg/m³ y 10 µg/m³ establecidos en la norma mexicana de partículas (NOM-025-SSA1-1993) y en las recomendaciones de la OMS, respectivamente, así como los costos monetarios asociados a estos impactos.

En las siguientes secciones se describe a detalle la dinámica urbana de cada localidad estudiada y el panorama general de la contaminación del aire por partículas suspendidas que se vive en estas zonas metropolitanas. También se describen los escenarios evaluados y posteriormente los resultados de la evaluación económica y de los impactos considerados en las tres ZM en conjunto y para cada una de ellas, así como su discusión y las recomendaciones para cada ZM. Finalmente, se presentan las limitaciones técnicas del estudio y el anexo metodológico donde se trata a detalle la metodología seguida en esta evaluación, los datos empleados y las consideraciones realizadas durante el proceso del cálculo de los impactos en la salud.

Para consultar la metodología en extenso para la estimación de los beneficios en salud véase V. Garibay-Bravo, L. Rojas-Bracho y G. Echániz-Pellicer (editoras) (2012), *Guía para evaluar los impactos en la salud por la instrumentación de medidas de control de la contaminación atmosférica*. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, 78 pp. ISBN: 978-607-8246-35-9. Disponible en formato electrónico en: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=682

Generalidades de las tres zonas metropolitanas analizadas

ZM del Valle de México

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) está conformada actualmente por las 16 delegaciones del Distrito Federal, 59 municipios del Estado de México y un municipio de Hidalgo (véase cuadro 14 de los *Anexos metodológicos*). En esta delimitación político-administrativas e concentra alrededor del 18% de la población total del país.

La zona mencionada se caracteriza por su desaceleración industrial y la consolidación del sector de prestación de servicios regionales y nacionales; es el centro financiero del país y sede de las principales empresas nacionales y extranjeras que operan en México (Mansilla, 2009).

Tanto las actividades económicas del Distrito Federal, como las del Estado de México, contribuyen, en conjunto, con 27% del PIB nacional. Las actividades terciarias contribuyen a su vez con 72.4% del PIB de ambos estados; entre las más importantes se encuentran la comercialización de bienes y servicios, así como su transporte y almacenamiento.

En cuanto a la industria destacan, debido a su mayor aporte a la riqueza de ambos estados (INEGI, 2013), la construcción y manufacturera, que comprende a la alimentaria de las bebidas y tabaco, así como la producción de derivados del petróleo y del carbón, industrias químicas y del plástico y hule.

Dada la dinámica económica de estos estados, en 2010 se reportó un parque vehicular de 5.9 millones de vehículos, y en 2008, se ubicaron 2,801 fuentes fijas en el Distrito Federal y el Estado de México.

Las PM₁₀ provienen, es su mayoría, de las vialidades con y sin pavimentación, así como del sector industrial. Por su parte, las emisiones de las PM_{2.5} provienen principalmente de las fuentes móviles y de la resuspensión de polvo en vialidades pavimentadas (SMA-GDF, 2010). Asimismo, debido a la intensa

Cuadro 1. Datos generales de la ZMVM para 2010

Población	20,116,842
Municipios	76
Índice de motorización	295 vehículos por cada mil habitantes
Parque vehicular	5.9 millones de vehículos
Número de fuentes fijas, 2008**	Total: 2801
Distrito Federal : 1569	
Estado de México: 1232	
Porcentaje del PIB por actividad económica (promedio ponderado por la población del D. F. y del Edo. Méx.)	1.4 % primarias 26.2% secundarias 72.4% terciarias
Contribución al PIB nacional: 27 %	
Vialidades pavimentadas y sin pavimentar	77.5% 22.5%
Monitoreo de partículas suspendidas	20 monitores*** 9 de PM _{2.5} y 11 PM ₁₀ Véase sección <i>Evaluación de la exposición</i> en los <i>Anexos metodológicos</i>

Fuente: INEGI, 2013

** SEMARNAT, 2014

***La configuración actual de la red puede consultarse en: <http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php>

actividad fotoquímica de la atmósfera de la ZMVM, se ha encontrado que alrededor del 25% de las PM_{2.5} que se miden son de origen secundario, es decir, que se forman a partir de precursores como los óxidos de azufre y nitrógenos (SO_x y NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) (Molina L. *et al.*, 2010).

ZM de Guadalajara

La Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) está conformada actualmente por ocho municipios: El Salto, Guadalajara, Ixtlahuacán de los Membrillos, Juanacatlán, Tlajomulco de Zúñiga, Tlaquepaque, Tonalá y Zapopan. En esta demarcación se concentra alrededor del 4% de la población total del país.

Al igual que la ZM del Valle de México, la ciudad de Guadalajara y sus municipios conurbados han experimentado la transición progresiva de sus actividades económicas en la última década, pasando de ser una economía rural a una industrial, y de bienes y servicios (SEMADES, 2012).

Jalisco aporta 6.3% del PIB nacional; el comercio, transporte y almacenamiento de bienes y servicios son las actividades económicas que más aportan a la riqueza del estado. En segundo lugar se encuentran la industria de la construcción, la alimentaria de las bebidas y tabaco, así como la producción de derivados del petróleo y del carbón, las industrias químicas, y del plástico y hule, y la de maquinaria y equipo.

Es importante mencionar que Jalisco presenta una importante actividad económica relacionada con la agricultura, la ganadería, el aprovechamiento forestal, la pesca y la caza (INEGI, 2013).

En 2008 se registraron 692 fuentes fijas cuyas emisiones contribuyeron con 48% de las emisiones de PM₁₀ y 60% de las PM_{2.5}, de las cuales la industria de alimentos, principalmente la producción de azúcar, representaron el porcentaje más alto. También las industrias química, vidriera, de pinturas y tintas, así como la metalúrgica aportan cantidades significativas. Por su parte, las fuentes de área, como las actividades de construcción,

Cuadro 2. Datos generales de la ZMG para 2010

Población	4 434 878
Municipios	8
Índice de motorización	406 vehículos por cada mil habitantes
Parque vehicular	1.8 millones de vehículos
Número de fuentes fijas en Jalisco**, 2008	692
Porcentaje del PIB por actividad económica	5.6% primarias 29.3% secundarias 65.1% terciarias Contribución al PIB nacional: 6.3%
Vialidades pavimentadas y sin pavimentar	77.8% 22.2 %
Monitoreo de partículas suspendidas	8 monitores*** 2 de PM _{2.5} y 8 PM ₁₀ Ver sección Evaluación de la exposición en los Anexos Metodológicos

Fuente: INEGI, 2013

** SEMARNAT, 2014

*** La configuración actual de la red puede consultarse en: <http://sigajalisco.gob.mx/aire/>

combustión de leña en hogares e incendios forestales, generan 47.8% de las PM₁₀ y 36.5% de las PM_{2.5} (SEMADES, 2012).

AM de Monterrey

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) está conformada actualmente por doce municipios: Apodaca, Cadereyta Jiménez, García, San Pedro Garza García, Gral. Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, Salinas Victoria, San Nicolás de los Garza y Santa Catarina. En esta área metropolitana se concentran 3.6% de la población total del país.

Si bien el AMM aloja importantes grupos industriales, como la industria de la producción de cerveza, de cemento, de bebidas embotelladas, así como de la industria petroquímica y de alimentos, la actividad económica basada en el comercio y la prestación de servicios se ha incrementado en los últimos años (SPMARN-GNL, 2009). Esto se aprecia en el alto porcentaje del PIB estatal (62.2%) que aportan las actividades económicas terciarias (INEGI, 2013).

Sin embargo, la industria de la transformación ocupa los primeros lugares a nivel nacional. Las principales actividades secundarias se ubican en los sectores de la industria de la construcción, alimentaria de las bebidas y del tabaco, de los derivados del petróleo y del carbón, de la industria química, del plástico y del hule, así como de la fabricación de productos a base de minerales no metálicos, las metálicas y la fabricación de maquinaria, aportan los porcentajes más altos al PIB del estado (INEGI, 2013).

En 2010 su índice de motorización fue de 434 vehículos por cada mil habitantes, cuyo valor es el más alto comparativamente con el del Valle de México y Guadalajara.

Las PM₁₀ y PM_{2.5} provienen en su mayoría de las fuentes fijas del sector de la extracción y beneficio de materiales no metálicos. Asimismo, provienen de las fuentes de área de la categoría de caminos

Cuadro 3. Datos generales de la AMM para 2010

Población	4106054
Municipios	12
Índice de motorización	434 vehículos por cada mil habitantes
Parque vehicular	1.77 millones de vehículos
Número de fuentes fijas en Nuevo León**, 2008	480
Porcentaje del PIB por actividad económica	0.8% primarias 37.0% secundarias 62.2 % terciarias Contribución al PIB nacional: 7.5%
Vialidades pavimentadas y sin pavimentar	91.3% 8.7%
Monitoreo de partículas suspendidas	6 monitores*** miden simultáneamente PM _{2.5} y PM ₁₀ Ver sección Evaluación de la exposición en los Anexos Metodológicos

Fuente: INEGI, 2013

** SEMARNAT, 2014

*** La configuración actual de la red puede consultarse en:
http://www.nl.gob.mx/?P=sima_metropolitano

pavimentados y no pavimentados, de la construcción urbana e industrial y de la suspensión eólica de polvo de origen geológico (SMA-GNL, 2009).

Tendencias de las PM_{2.5} y PM₁₀ en las tres zonas metropolitanas (2004-2011)

En este apartado se presentan los valores tendenciales de las concentraciones anuales en las tres zonas metropolitanas y su comparación con los límites anuales normados en México y los recomendados por la OMS.

Las figuras 2 y 3 muestran que:

- Las concentraciones de partículas PM₁₀ han permanecido por arriba del límite anual de la norma oficial mexicana (NOM), y en consecuencia, del recomendado por la OMS durante los ocho años presentados. En 2010 las concentraciones registradas en el Valle de México, Monterrey y Guadalajara son 2.1, 2.0 y 1.3 veces mayor al límite de la NOM y 5.2, 5.0 y 3.2 veces el de la OMS, respectivamente.
- Por su parte, las concentraciones anuales de PM_{2.5} de las redes de las zonas metropolitanas estudiadas para las que se tuvo suficiente información, han estado por arriba tanto del límite normado nacional como por el recomendado por la OMS. Es importante mencionar que en la ZMG sólo se presentan datos de 2010 y 2011 por problemas con la calibración de los equipos y, desafortunadamente, en el AMM sólo se presenta el indicador para 2011 por insuficiencia de datos (INESEMARNAT, 2011). En 2010, las concentraciones registradas en el Valle de México y Guadalajara son 1.7, y 1.5 veces mayor al límite de la NOM y 2.5 y 2.2 veces el de la OMS, respectivamente.

Figura 3. Cumplimiento del límite anual de PM₁₀

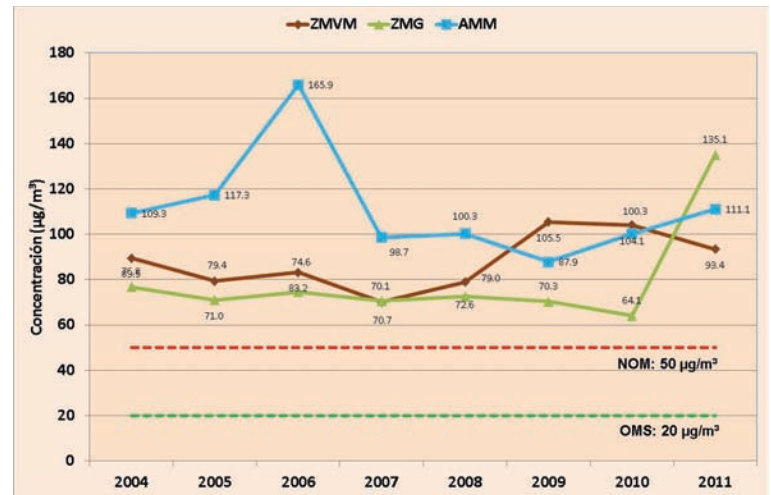
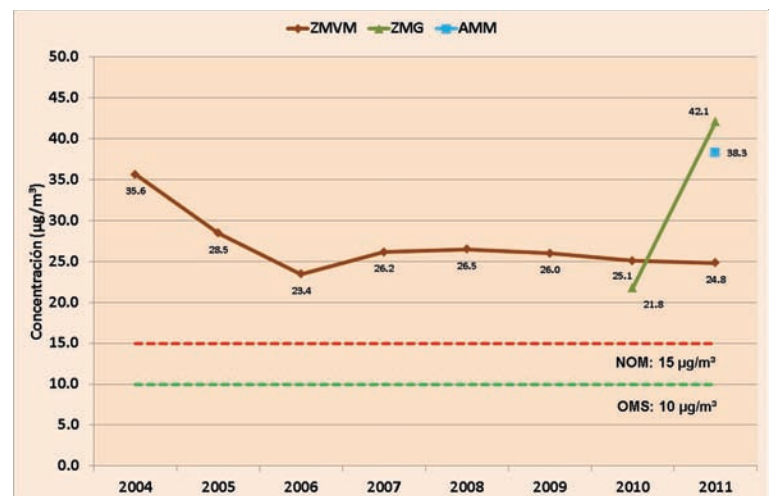


Figura 2. Cumplimiento del límite anual de PM_{2.5}



Dada la insuficiencia de datos en la ZMG y en el AMM para evaluar el límite anual de las PM₁₀ y PM_{2.5}, se presentan en el *anexo metodológico* de manera complementaria las tendencias de los *Días en los que se rebasa el límite de 24 horas de la NOM* de estos dos contaminantes en el periodo 2004-2011 (ver, figuras 21 y 22). Como se aprecia en esas tendencias han existido problemas históricos con las partículas en estas demarcaciones. Por ejemplo, en el año base de cálculo de este estudio (2010) se presentaron 129, 64 y 21

días, en los que se rebasa el límite de la norma de 24 horas para PM_{10} , en el AMM, ZMVM y ZMG, respectivamente. En el caso de las $PM_{2.5}$, en ese mismo año se registraron 19, 14 y 6 días que rebasaron el límite de 24 horas de la NOM para el AMM, ZMVM y ZMG, respectivamente. Llama la atención los 42 días registrados en la ZMG en 2011 porque resulta ser el valor más alto de todas las ZM y para todo el periodo de análisis para este contaminante.

Escenario base de $PM_{2.5}$ en 2010

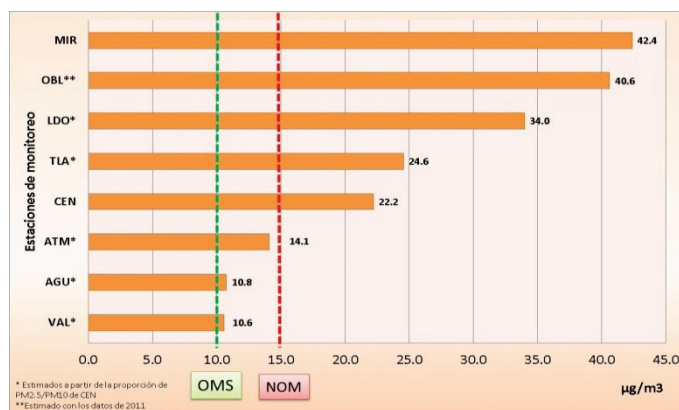
En esta sección se presentan en las figuras 4, 5 y 6 las concentraciones promedio anuales de $PM_{2.5}$ para cada estación de monitoreo³, cuyos valores se utilizaron para el cálculo de los beneficios en la salud de la población en las tres zonas metropolitanas de estudio. En el caso del Valle de México y Guadalajara se estimaron algunos valores a través de la concentración medida de PM_{10} y la proporción de $PM_{2.5}/PM_{10}$ estimada en las estaciones en donde se miden simultáneamente las dos fracciones de PM (véase la sección *Evaluación de la exposición* del anexo metodológico).

La mayoría de las concentraciones registradas en las estaciones de monitoreo de las tres ZM rebasan el límite anual de la norma mexicana y todas rebasan el límite recomendado por la OMS, como se aprecia en las figuras. En el caso de la ZMVM, la concentración promedio anual de la estación Pedregal (PED) es la única que no rebasa el límite de la NOM. Las concentraciones más elevadas de $PM_{2.5}$ en esta demarcación se registran al norte de la ciudad y las más bajas en el suroeste (ver la sección *Representación espacial de las concentraciones de las $PM_{2.5}$* del anexo metodológico).

Figura 4. Concentraciones anuales de $PM_{2.5}$ en ZMVM. 2010



Figura 5. Concentraciones anuales de $PM_{2.5}$ en ZMG, 2010



³ El cálculo de las concentraciones promedio anuales se realizó con una suficiencia del 75% de información horaria, pero no se tomó en cuenta la suficiencia trimestral que se especifica en la NOM-025-SSA1-1993.

Por su parte, la ZMG presenta una alta variabilidad en las concentraciones de $PM_{2.5}$, pues las que indican tres estaciones, Atemajac (ATM), Águilas (AGU) y Vallarta (VAL), no rebasan el límite nacional; sin embargo, cabe hacer notar que las estaciones de Miravalle (MIR) y Oblatos (OBL) registran las concentraciones más elevadas en las tres ZM alcanzando 42.4 , $40.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, como se puede apreciar en las gráficas anteriores; dichas estaciones se localizan al este y suroeste de la ZMG (véase la sección *Representación espacial de las concentraciones de las $PM_{2.5}$* del anexo metodológico). Estas concentraciones representan más del doble y del triple del valor del límite nacional y más del cuádruple del valor recomendado por la OMS.

En el AMM todas las concentraciones rebasan tanto el límite nacional como el recomendado por la OMS. La mayoría de las concentraciones representan el doble o triple del límite recomendado por la OMS. En el AMM, las concentraciones más elevadas se presentan en el SO (suroeste), NO (noroeste) y NE (noreste), siendo las más bajas en la estación SE (sureste); las siglas corresponden al área geográfica en la que se ubican las estaciones (véase la sección *Representación espacial de las concentraciones de las $PM_{2.5}$* del anexo metodológico).

Figura 6. Concentraciones anuales de $PM_{2.5}$ en AMM, 2010



Escenarios de reducción de concentraciones

Como se expuso en las secciones previas, en las tres zonas metropolitanas estudiadas las concentraciones promedio anuales de $PM_{2.5}$ rebasan continuamente el límite anual, así como el límite diario de 24 horas, establecidos en las normas mexicanas, y por ende, las recomendadas por la OMS.

Por lo anterior, en este estudio se consideran tres escenarios, uno que contempla las condiciones actuales (base) de las concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ y dos escenarios hipotéticos de reducción de concentraciones de $PM_{2.5}$, los cuales se describen en el cuadro 4.

Cuadro 4. Escenarios de reducción de las concentraciones de $PM_{2.5}$

Escenarios modelados	Nombre	Descripción
1	<i>Base</i>	Concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ en 2010
2	<i>NOM</i>	Reducción de las concentraciones ambientales en el área de cobertura de la red a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor límite de la NOM-025-SSA1-1993
3	<i>OMS</i>	Reducción de las concentraciones ambientales en el área de cobertura de la red a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor recomendado en las guías de la OMS

En adelante los escenarios serán denominados con los nombres: Base, NOM y OMS, en concordancia con el cuadro 4. Es importante destacar que el valor del límite anual para concentraciones ambientales de las $PM_{2.5}$, establecidos en la norma oficial mexicana de partículas (NOM-025-SSA1-1993), se encuentra no sólo por arriba de los valores de las guías de la OMS, sino también de los valores normados en países como Singapur, Estados Unidos y Japón. Cabe mencionar que la US-EPA actualizó, a finales de 2012, el límite anual de las $PM_{2.5}$ de 15 a $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, acercándose más al valor de la OMS (véase la sección *Normatividad nacional e internacional sobre las $PM_{2.5}$* del anexo metodológico).

Beneficios en la salud humana y su valoración

La valoración económica de los beneficios en la salud humana constituye un elemento clave en los análisis costo-beneficio de la mayor parte de las políticas públicas que pretenden reducir el riesgo de la mortalidad de los individuos, como la salud humana, la seguridad laboral, las condiciones ambientales y la seguridad vial, entre otras. En el caso de los beneficios en el ambiente y a la salud humana se contrastan con los costos asociados para la implementación de una o varias medidas de control de emisiones de los contaminantes del aire a fin de justificar su inversión.

Asimismo, es importante enfatizar que esta práctica de monetarizar los impactos en la salud permite sumarlos en un solo valor, y así es posible compararlos con los costos de la implementación virtual de medidas de control que mitiguen el riesgo de estos impactos.

La monetarización de los casos de mortalidad prematura estimados en el presente estudio se realizó utilizando el valor estadístico de la vida (VEVo VSL en inglés) estimado a partir de un metanálisis de estudios de disponibilidad a pagar realizado en Estados Unidos de América (Kochi, 2006) que se ajustó para México utilizando la variable del ingreso nacional bruto per cápita, método de disponibilidad a pagar (INE, 2008; INE, 2010).

Los impactos en la salud incluidos en el presente estudio (ver, cuadro 5) son los asociados con la estimación de los casos de mortalidad prematura a causa de enfermedades cardiovasculares, por cáncer de pulmón y por enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (EPOC) en población mayor a 30 años para el año base 2010.

Si bien dichos impactos se estimaron únicamente para 2010, se utilizaron funciones exposición-respuesta derivadas de estudios de cohorte⁴ que capturan los impactos de la contaminación a largo plazo e incorporan también, en algunos casos, los impactos a corto plazo; no obstante, para las estimaciones de los casos evitados por la mortalidad cardiovascular y cáncer de pulmón se utilizó un factor que refleja el periodo de latencia⁵ de 0.36 y 0.05, respectivamente (Stevens, 2008). Así, se estiman solamente los casos

Cuadro 5. Impactos en la salud estimados en la población de las tres ZM

Mortalidad por enfermedades

Cardiovascular

Por cáncer de pulmón

Pulmonares Obstructivas Crónicas (EPOC)

⁴ Los estudios de cohorte consisten en el seguimiento de una o más cohortes de individuos sanos que presentan diferentes grados de exposición a un factor de riesgo en quienes se mide la aparición de la enfermedad o condición en estudio.

⁵ El periodo de latencia en las enfermedades crónicas es el lapso que transcurre entre la exposición al agente peligroso y la respuesta del organismo que se traduce en un efecto, que para este documento resulta la mortalidad.

de mortalidad evitada que estadísticamente ocurrirían en 2010, sin considerar los que se desarrollarán durante los siguientes 20 años, por congruencia con los valores de incidencia utilizadas en este estudio.

Adicionalmente, es importante mencionar que los estudios toxicológicos que analizan la plausibilidad biológica de los efectos de las partículas en la salud, evidencian los efectos en particular de las partículas finas y ultrafinas en el desencadenamiento de mecanismos que afectan negativamente a las células, como la citotoxicidad por estrés oxidativo, generación de radicales libres de oxígeno, daño oxidativo del ADN, mutagenicidad, y la estimulación de factores pro-inflamatorios; tales efectos se deben principalmente a la diversa composición química de las partículas que les confieren las diferentes fuentes de emisión (Valavanidis *et al.*, 2008).

Las estimaciones en la mortalidad se realizaron aplicando el modelo BenMAP (véase la sección correspondiente de los anexos metodológicos) recomendado por la EPA y adaptado para México. Dicho modelo incorpora un sistema de información geográfica que permite incluirla localización geográfica de las principales variables de cálculo de los beneficios económicos, población, concentración, datos de salud, datos para la valoración económica, etc., con lo cual se mejora sustancialmente la certidumbre de los resultados.

Los datos utilizados para ejecutar el modelo son:

1. El decremento de las concentraciones anuales de las PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para cumplir con los valores límite de los dos escenarios analizados.
2. Los coeficientes de las funciones exposición-respuesta (FER), que relacionan un cambio en una unidad de concentración con un cambio en el impacto de la salud.
3. La información basal sobre la salud de la población. Para este estudio se utilizaron las tasas de mortalidad municipal de las entidades incluidas en la definición de cada ZM.
4. Las características de la población (por ejemplo, estructura demográfica y etaria de la población) por Área Geoestadística Básica (AGEB).

Es conveniente aclarar que BenMAP evalúa implícitamente la exposición de la población utilizando la distribución espacial de la población y de las concentraciones por AGEB en el área de estudio.

La metodología que se aplicó para la estimación de los impactos en la salud en las tres zonas metropolitanas se aborda con detalle en los anexos metodológicos de este documento.

Beneficios económicos

La valoración económica de la mortalidad prematura, como se presenta en el cuadro 6, para las tres zonas metropolitanas muestra que se tendrían mayores beneficios económicos en el escenario OMS, en aproximadamente 1.6 veces, respecto del escenario NOM.

En la ZM del Valle de México se obtuvieron los beneficios económicos más altos, alcanzando los \$30 mil millones de pesos bajo el escenario OMS, que en términos absolutos representa el valor de mayor magnitud comparado con las otras ZM estudiadas. Los beneficios económicos estimados en las ZM de Guadalajara y Monterrey son muy similares entre sí; no obstante los de Guadalajara son ligeramente más altos.

En los escenarios NOM y OMS de reducción de PM_{2.5} en las tres ZM se alcanzarían beneficios económicos en conjunto de 27 y 45 miles de mdp, respectivamente.

Cuadro 6. Beneficios monetarios bajo los dos escenarios analizados, en pesos de 2010

Demarcación	Escenario 1	Escenario 2
	NOM	OMS
(miles de millones de pesos de 2010)		
ZM del Valle de México	\$16	\$30
ZM de Guadalajara	\$6	\$8
AM de Monterrey	\$5	\$7
Total	\$27	\$45

Impactos en la mortalidad

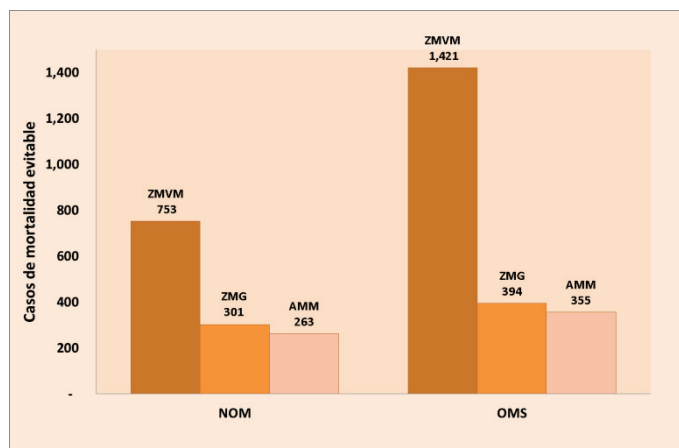
En esta sección se presentan con detalle los resultados de las estimaciones de los casos de mortalidad evitables bajo los dos escenarios de reducción de concentraciones de las PM_{2.5}.

Los casos de mortalidad evitables estimados en las tres ZM del Valle de México, Guadalajara y Monterrey para las tres causas de enfermedad consideradas ascienden a 1,317 para el escenario NOM y a 2,170 para el escenario OMS (véase cuadro 7).

La ZM del Valle de México obtuvo el mayor número de casos evitables de mortalidad para los dos escenarios, seguido de Guadalajara y Monterrey. El mayor número de casos de mortalidad evitables se debe a enfermedades cardiovasculares, seguido de las EPOC y por cáncer de pulmón.

Si las concentraciones de PM_{2.5} cumplieran con los límites de la NOM o la OMS se evitarían, respectivamente:

Cuadro 7. Número total de casos de mortalidad evitable en las tres zonas metropolitanas, 2010



- En el Valle de México, 753 y 1,421 casos de mortalidad prematura en adultos mayores de 30 años.
- En Guadalajara, 301 y 394 casos de mortalidad prematura en adultos mayores de 30 años.
- En Monterrey, 263 y 355 casos de mortalidad prematura en adultos mayores de 30 años.

Resultados

A continuación se describen los resultados con mayor detalle únicamente bajo el escenario de la OMS para cada ZM, dado que este escenario presenta los mayores beneficios económicos.

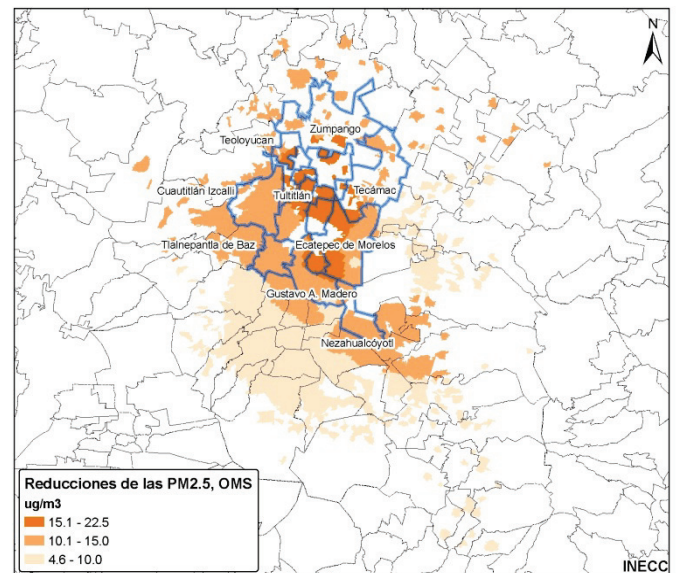
Valle de México

En la figura 7 se presentan las delegaciones y los municipios que requieren mayor atención para reducir la exposición de la población. Estos se enlistan a continuación: Gustavo A. Madero (delegación de Distrito Federal) y Tlalnepantla de Baz, Jaltenco, Tonanitla, Cuautitlán Izcalli, Zumpango, Tultitlán, Tultepec, Teoloyucan, Tecámac, Nextlalpan, Nezahualcóyotl, Melchor Ocampo, Ecatepec de Morelos, Cuautitlán y Coacalco de Berriozábal (municipios del Estado de México). La mayoría de estas localidades se ubican en la zona norte y noreste, como se observa en el mapa resaltado en contornos de color azul.

En términos de la distribución espacial del número de casos de mortalidad prematura evitable en 2010 que se derivó de este estudio, las delegaciones y los municipios en los que se podrían evitar más de 100 casos de mortalidad prematura, son las delegaciones Tlalpan, Azcapotzalco, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Álvaro Obregón, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Coyoacán, Iztapalapa; y los municipios Tlalnepantla de Baz, Nezahualcóyotl y Ecatepec de Morelos.

Finalmente es importante decir que si bien las concentraciones más altas se registran en la zona norte, el riesgo de casos de mortalidad evitable es elevado tanto en esta zona como en el centro de la ciudad debido a las concentraciones que prevalecen y a la alta densidad de población.

Figura 7. Reducciones de las concentraciones de las PM_{2.5} requeridas en las zonas pobladas del Valle de México



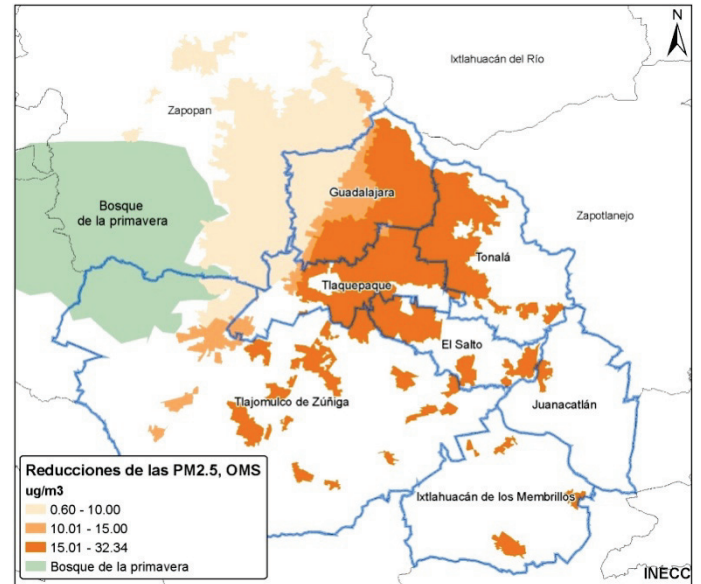
ZM de Guadalajara

Los municipios de Guadalajara, El Salto, Tlaquepaque, Tonalá, Juanacatlán y Tlajomulco de Zúñiga requieren mayor atención para reducir la exposición de la población (ver, figura 8). La mayoría de estas localidades se ubican en la zona oriente y sur, como se observa en el mapa resaltado en contornos de azul.

La distribución espacial de los casos de mortalidad prematura en los municipios de la zona metropolitana de Guadalajara muestra los valores más altos en los municipios de Guadalajara, Tlaquepaque y Tonalá que en conjunto ascienden a 327 casos, este valor representa 83% de los casos estimados en los municipios que conforman la zona metropolitana.

El municipio de Guadalajara muestra el mayor riesgo de mortalidad prematura por las tres causas analizadas, esto se debe a las altas concentraciones registradas y a la alta densidad poblacional de este municipio.

Figura 8. Reducciones de las concentraciones de las PM_{2.5} requeridas en las zonas pobladas de la ZMG

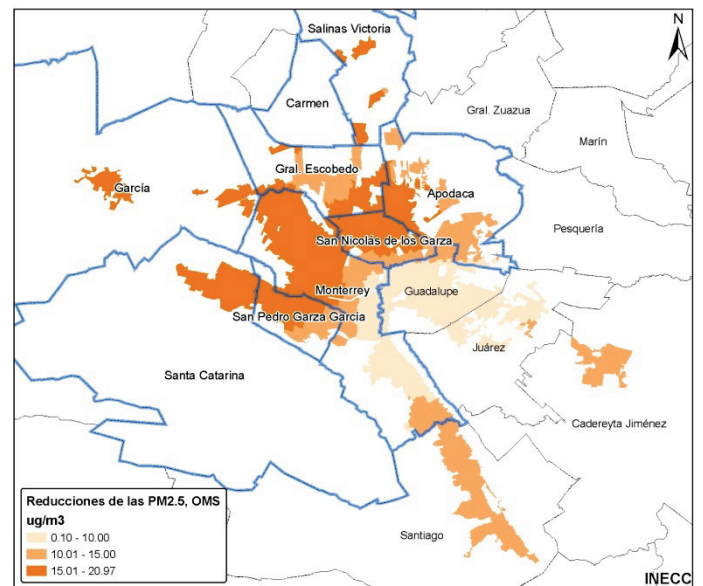


AM de Monterrey

Los municipios de Santa Catarina, San Pedro Garza García, Monterrey, San Nicolás de los Garza, Gral. Escobedo y Apodaca requieren mayor atención para reducir la exposición de la población (ver, figura 9). La mayoría de estas localidades se ubican en la zona poniente y norte, como se observa en el mapa resaltado en contornos de azul.

La distribución espacial de los casos de mortalidad evitable en los municipios del Área Metropolitana de Monterrey muestra los valores más altos en los municipios de Monterrey, San Nicolás de los Garza y Guadalupe que en conjunto ascienden a 252 casos, este valor representa 71% de los casos estimados en los municipios que conforman la zona metropolitana.

Figura 9. Reducciones de las concentraciones de las PM_{2.5} requeridas en las zonas pobladas de la AMM



Finalmente, es importante comentar que en este estudio solamente se consideran los costos económicos asociados a la mortalidad prematura por tres causas de enfermedades. Sin embargo, vale la pena señalar que estas estimaciones resultan conservadoras ya que no incluyen los costos de morbilidad asociados con el cuidado y tratamiento de enfermedades agudas y crónicas, ni la pérdida de productividad por malestares respiratorios, producidas por la contaminación del aire.

Recomendaciones

Las zonas metropolitanas del Valle de México (ZMVM), Guadalajara (ZMG) y Monterrey (AMM) evaluadas en este estudio constituyen los principales centros económicos del país; aportan en conjunto 41% del PIB y concentran alrededor del 26% de la población nacional. Esta intensa actividad económica, principalmente en la comercialización de bienes y servicios, ha traído como consecuencia el deterioro de la calidad del aire desde hace varias décadas.

En el Valle de México, por ejemplo, las concentraciones de PM_{2.5} han permanecido por arriba de los límites anuales establecidos en las normas mexicanas, y por ende de los valores recomendados por la OMS, dentro del periodo analizado (2004-2011). Guadalajara y Monterrey registran concentraciones anuales de las PM₁₀ que han rebasado continuamente el límite anual normado en México y el recomendado por la OMS; esto podría indicar que las concentraciones de las PM_{2.5} también han estado por arriba de los límites normados para este contaminante, considerando que la proporción de PM_{2.5} en las PM₁₀ es de aproximadamente la mitad. No obstante, es indispensable que Guadalajara y Monterrey continúen monitoreando las PM_{2.5} para constatar esta inferencia.

Durante 2010, año base de este estudio, los promedios anuales de las concentraciones de PM_{2.5} registradas en la mayoría de los 34 monitores que dan seguimiento a este contaminante en las redes de monitoreo de las tres zonas metropolitanas estudiadas, rebasaron el límite anual tanto de la norma mexicana como el que recomienda la OMS. Cabe hacer notar que Guadalajara registra concentraciones promedio anuales que rebasan los 30 µg/m³ (que es el doble del valor de la NOM, 15 µg/m³; y el triple del límite de la OMS, 10 µg/m³) en las estaciones de Miravalle, Oblatos y Loma Dorada. En el Valle de México, también se han registrado valores altos en las estaciones de Xalostoc y Villa de las Flores y, en Monterrey en la estación de Santa Catarina.

Los resultados que se ofrecen en este estudio permitirán, a través de un análisis costo-beneficio, priorizar las acciones de política pública para reducir las emisiones de las PM_{2.5}, así como identificar las localidades (delegaciones/municipios) en donde se requiere focalizar los recursos financieros que ofrezcan un mayor beneficio en la salud con el beneficio adicional de reducir contaminantes climáticos de vida corta, tal como el carbono negro.

En el diseño e implementación de acciones que incidan de manera efectiva y eficiente en la reducción de las concentraciones ambientales de las partículas suspendidas, es indispensable que las autoridades de medioambiente federal y estatal tomen en cuenta las siguientes recomendaciones generales:

1. Fortalecer los sistemas de monitoreo actuales a fin de ampliar la cobertura de medición de las PM_{2.5}, así como la implementación de mejores prácticas de operación que permitan contar con información de mayor calidad.
2. Mejorar la certidumbre de los inventarios de emisiones de contaminantes convencionales ya que estos constituyen una pieza clave de información en la formulación de política pública en este tema.
3. Revisar y en su caso actualizar la normatividad federal y local que limita las emisiones de vehículos automotores, en especial los vehículos que utilizan diésel como combustible.

4. Introducir tecnologías vehiculares más limpias, para lo cual es indispensable contar con combustibles con ultra bajo contenido de azufre en todo el país.

5. Fortalecer las políticas de planificación urbana y ordenamiento del territorio, donde la movilidad y la organización de la ciudad ocupan posiciones prioritarias. Con ello se favorecería un transporte más eficiente, con menor consumo de energía, evitando una ocupación innecesaria del territorio.

A continuación se proporcionan algunas recomendaciones específicas para cada zona metropolitana, a partir de los resultados derivados de este estudio y de los Programas de Mejoramiento de la Calidad del aire (PROAIRE) de cada localidad.

ZMVM

Es indudable que en los últimos años la calidad del aire en la ZMVM ha mejorado considerablemente en comparación con la que presentaba en la década de 1990. Los programas de mejoramiento de la calidad del aire (PROAIRES) han tenido un efecto positivo en la mayoría de los contaminantes primarios (SO₂, NO_x y CO) que mantienen una tendencia histórica decreciente. Sin embargo, durante el 2011, el ozono presentó un incremento de 2.5 ppb en el promedio anual y las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} aumentaron en 5 y 3 µg/m³, respectivamente (SMA-DF, 2012).

De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal, las PM_{2.5} son emitidas principalmente por las fuentes móviles, especialmente por los vehículos pesados a diésel⁶ y la resuspensión de polvo en vialidades pavimentadas.

Si bien las acciones para reducir las emisiones del sector transporte han tenido un efecto positivo en la reducción de las emisiones de la mayoría de los contaminantes gaseosos, se requiere continuar implementando políticas públicas en coordinación con los tres órdenes de gobierno para mitigar las emisiones provenientes de los vehículos pesados a diésel.

En este estudio se estimó que si se redujeran las concentraciones de PM_{2.5} a tal grado que cumplieran con las normas internacionales de la OMS, se podrían ahorrar alrededor de 30 mil mdp, que son los beneficios económicos más altos estimados en este estudio.

ZMG

El caso de la Zona Metropolitana de Guadalajara es, sin duda, preocupante. Las tendencias de las PM₁₀ y PM_{2.5} registraron un incremento de la concentración promedio anual de 57 µg/m³ y 20 µg/m³ de 2010 a

⁶Las emisiones de la combustión de diésel se clasifican como carcinogénico para los humanos, de acuerdo con el boletín de la OMS emitido en junio de 2012: http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2012/pdfs/pr213_E.pdf

2011, respectivamente. Lo que demuestra un grave deterioro de la calidad del aire en el tema de las partículas suspendidas.

De acuerdo con el más reciente PROAIRE 2011-2020 de Jalisco, las emisiones de PM_{2.5} provienen principalmente de fuentes fijas, como la industria de alimentos; de las fuentes de área, como actividades de construcción, incendios forestales y combustión de leña doméstica; y de las fuentes móviles, como los autos particulares tipo sedán, los autobuses de transporte urbano e inter-urbano, las pick up, y vehículos privados y comerciales con un peso mayor a tres toneladas.

Las acciones de política pública contenidas en el PROAIRE incluyen metas específicas para reducir las emisiones de las fuentes móviles, puntuales y de área, y requieren de financiamiento público para su diseño e implementación. Los resultados que aquí se presentan pueden emplearse para fundamentar este financiamiento, por ejemplo el que las concentraciones de PM_{2.5} no cumplan con las normas mexicanas de protección a la salud tiene un costo de alrededor de 6 mil millones de pesos, equivalente al 8% del presupuesto total del estado de Jalisco asignado en 2012.

AMM

En el Área Metropolitana de Monterrey prevalece una situación similar a la de Guadalajara, las concentraciones de PM_{2.5} presentaron un incremento anual (de 2010 a 2011) de 12.6 µg/m³, por lo que su valor promedio anual se situó 2.5 veces arriba del límite nacional normado y casi cuatro veces del límite recomendado por la OMS.

Las emisiones de las PM_{2.5} provienen principalmente de las actividades de extracción y beneficio de materiales no metálicos, de la resuspensión de polvo de caminos pavimentados y no pavimentados, así como de la construcción urbana e industrial. En este sentido, el PROAIRE del AMM 2008-2012, incluye una serie de medidas encaminadas a reducir las emisiones de dichas actividades y fuentes de emisiones, entre las que destacan, el establecimiento de programas de reducción de emisiones del sector empresarial que realizan actividades de aprovechamiento de minerales y sustancias no reservadas a la federación, el diseño e implementación de campañas de reducción de emisiones por la resuspensión de polvos en caminos pavimentados y no pavimentados y áreas erosionadas.

De acuerdo con los resultados del presente estudio, los beneficios en la salud en 2010 serían 30 veces y 21 veces mayores en el escenario *OMS* y *NOM*, respectivamente, que el costo estimado para estas tres medidas señaladas (de 236 millones de pesos) (SPMARN-GNL, 2009), pudiéndose evitar, tan sólo en el municipio de Monterrey, 159 casos de mortalidad prematura.

Finalmente, las tres zonas metropolitanas estudiadas presentan concentraciones ambientales de las PM_{2.5} que superan los valores normados nacionales e internacionales. La evidencia nacional e internacional de los estudios epidemiológicos indican que existe una relación estadísticamente significativa entre la exposición crónica a dichas partículas y la mortalidad prematura. Asimismo, es importante tener en cuenta que hasta la fecha los estudios epidemiológicos no han encontrado evidencia de que exista un umbral bajo el cual no se presenten impactos en la salud por la exposición a partículas (Schwartz et al., 2002). Incluso la OMS reconoce que esto implica que los lineamientos y estándares, que establecen límites máximos de

concentración ambiental de partículas, no proveen protección total para la salud de la población (WHO, 2006).

En este estudio se evaluaron los efectos en la mortalidad prematura y se tradujeron a valores económicos a fin de que los funcionarios de los gobiernos y las asociaciones civiles y la ciudadanía en general consideren los impactos en la salud de la población por la contaminación originada por las emisiones de las $PM_{2.5}$, así como los costos asociados a la misma.

Limitaciones del estudio

Este tipo de evaluación conlleva incertidumbre asociada a los métodos de cálculo, a la información utilizada y a las suposiciones realizadas en cada etapa metodológica del estudio, lo que podría tener un efecto no cuantificado de los resultados estimados. Siguiendo las recomendaciones internacionales de la evaluación de beneficios en la salud, a continuación se listan y se describen los datos y procesos que acarrearán incertidumbre al cálculo para que puedan ser considerados en estudios posteriores.

Selección de la función exposición-respuesta (FER)

En el caso de los riesgos relativos para estimar la incidencia de los casos de mortalidad evitable por enfermedades cardiovasculares se utilizaron los riesgos relativos de los estudios de las seis ciudades (Six Cities) y el de la Sociedad Americana de Cáncer (ACS, por sus siglas en inglés), cuyos coeficientes se combinan en un solo valor utilizando como ponderador las varianzas de los datos de cada estudio (Pope *et al.*, 2004; Laden *et al.*, 2006). De igual forma se hizo en el caso de la mortalidad por cáncer de pulmón. Para la mortalidad por EPOC se utilizó el riesgo relativo más reciente de un estudio de cohorte (Lepeule *et al.*, 2012).

Esto resulta lo más apropiado en México ante la falta de estudios de cohorte locales, ya que dichos estudios cuentan con un mejor diseño, consideran un mayor número de variables confusoras⁷ y una mejor estimación de la exposición si se los compara con los estudios realizados en México. No obstante, esta extrapolación de información entre poblaciones y regiones geográficas introduce incertidumbre en la evaluación de los impactos en la salud, a pesar de tomar en cuenta el mismo contaminante, la misma estructura demográfica y algunos factores socioeconómicos (INE-SEMARNAT, 2012).

Evaluación de la exposición

La evaluación de la exposición se estimó relacionando las concentraciones de PM_{2.5} distribuidas espacialmente en el área de estudio y la densidad de población localizada en esa área. A continuación se describen los procesos de cálculo que le confieren incertidumbre a la evaluación de la exposición.

Cuantificación de las concentraciones de PM_{2.5}

Las concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} para 2010, año base del estudio (véase la sección *Escenario base de PM_{2.5} en 2010*) se obtuvieron de los registros de los monitores de PM_{2.5}, en el caso del AM de Monterrey. En los casos del Valle de México y Guadalajara, se utilizó una combinación de los valores registrados en los monitores de PM_{2.5} y las estimaciones a partir de las PM₁₀, partiendo del hecho de que las PM_{2.5} son una fracción de las PM₁₀, esto con la finalidad de contar con la mayor cantidad de datos distribuidos geográficamente en la región de estudio. Por otra parte, en el caso de Guadalajara se

⁷Una variable confusora está asociada con la exposición y el evento en estudio, por lo que una diferencia en su distribución en los grupos que se comparan puede distorsionar los resultados.

utilizó el promedio anual de 2011 para la estación Oblatos con la premisa de que la variación interanual no es significativa. No obstante, estas consideraciones podrían añadir incertidumbre a los resultados derivados de este estudio.

Distribución espacial de las PM_{2.5}

Para la estimación de la exposición de la población, el modelo BenMAP realiza una interpolación espacial de las concentraciones anuales de PM_{2.5} asignadas a los puntos que representan los monitores de este contaminante. El método de interpolación que se aplicó en este estudio es el vecino promedio basado en una partición del plano de acuerdo con el método Voronoi (*Voronoi Neighbor Averaging*, VNA). Como se aprecia en los mapas de la sección *Redes de monitoreo de partículas suspendidas*, la mayoría de los monitores se concentran en la zona centro de las ZM, por lo tanto, existe una alta certidumbre de que en un radio de 5 km a partir del punto que representa el monitor, los valores interpolados tengan más certeza que aquellos más lejanos de este radio de influencia. Particularmente las zonas con población al sur de Monterrey podrían presentar una incertidumbre alta en la interpolación de las concentraciones dada la forma estrecha que presenta geográficamente la distribución de las AGEB debido a los cerros que le rodean. Sin embargo, dicha incertidumbre no debería influir demasiado en el resultado final si se toma en cuenta que en estas zonas la densidad de población es menor a la de la región centro.

Datos de salud de las poblaciones

Las tasas de mortalidad municipal utilizadas en este estudio, para las tres causas de enfermedades modeladas, se obtuvieron de las bases de datos del INEGI, disponibles en su página electrónica para el año base del estudio (2010). Los faltantes de información de estos valores se cubrieron siguiendo los criterios que se describen:

1. Con valores obtenidos en alguno de los tres años que antecede el año base de cálculo (2010), es decir, desde 2008, o con la tasa de 2011, año para el cual se puede obtener la información más reciente.
2. A falta de valores en años anteriores o posteriores, conforme al criterio anterior, se utilizó el valor de la tasa estatal correspondiente.

En el cuadro 8 se presenta el número de localidades en cada zona metropolitana en donde se tuvo que sustituir la tasa de mortalidad cardiovascular por valores encontrados en otros años o por el valor de la tasa estatal en 2010.

Cuadro 8. Tasas de mortalidad cardiovascular sustitutas

Localidades	ZM Valle de México	ZM Guadalajara	AM Monterrey
Tasas de otros años*	23	3	5
Tasas estatales	8	0	4

* De 2008 en adelante.

Estos dos criterios fueron aplicados bajo el supuesto de que la variación de las tasas de mortalidad no cambia significativamente dentro de los dos años que anteceden y preceden al año de interés. Sin embargo, por causas extraordinarias podría haber diferencias entre un año y otro.

Valoración económica

La evaluación económica de los impactos en la mortalidad prematura se cuantificó mediante el valor de una vida estadística (VSL, por sus siglas en inglés) de un metanálisis realizado en Estados Unidos de América basado en la metodología de disponibilidad a pagar. Dicho valor se ajustó utilizando el ingreso mexicano con dos escenarios de elasticidad, en los anexos metodológicos se detalla este ajuste. Es importante aclarar que en el momento de la realización del estudio este método de ajuste fue la mejor aproximación para estimar el VSL para México; no obstante, sería muy útil realizar un estudio de disponibilidad a pagar en México con el fin de determinar un VSL mexicano.

Referencias

Abt Ed., 2003. *BenMAP: Environmental Benefits Mapping and Analysis Program: User's Manual: Appendices*. Research Triangle Park, NC, Prepared by Abt Associates Inc for the Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency.

DOF, 2009. Diario Oficial de la Federación. PRESUPUESTO de Egresos de la Federación para el Ejercicio Fiscal 2010. 7 de diciembre 2009. Disponible en la Web: http://www.dof.gob.mx/avisos/1937/SHCP_02_071209/SHCP_02_071209.htm.

INE, 2008. Estudio de evaluación socioeconómica de la reducción del contenido de azufre en Gasolina Magna y Pemex Diésel. Instituto Nacional de Ecología - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F. Reporte 91 pp. Reporte interno.

INE, 2010. Introducción al análisis de riesgos ambientales. Editoras: Irina Ize-Lema, Miriam Zuky Leonora Rojas-Bracho. Instituto Nacional de Ecología - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F. 219 pp. Disponible en: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=636.

INE, 2011. Almanaque de datos y tendencia de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009). Instituto Nacional de Ecología - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, 408 pp.

INEGI, 2013. Consulta de bases de datos en línea. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/>.

INE-SEMARNAT, 2012. Guía para evaluar los impactos en la salud por la instrumentación de medidas de control de la contaminación atmosférica. INE. 78 pp.

Laden F., Schwartz J., Speizer F. E., Dockery D. W., 2006. Reduction in fine particulate air pollution and mortality: extended follow-up of the Harvard Six Cities study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 173: 667-672.

Lepeule J., Laden F., Dockery D. y Schwartz J., 2012. Chronic Exposure to Fine Particles and Mortality: An Extended Follow-up of the Harvard Six Cities Study from 1974 to 2009. *Environmental Health Perspectives*, volume 120, number 7.

Lim S. S. *et al.*, 2012. Comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet*; vol 380, December 15/22/29, 2012. www.thelancet.com.

Mansilla E., 2009. Marco general de riesgo en México. Investigación para la política pública, ODM's y Pobreza. RBLAC-UNDP. New York. Reporte número MDG-07-2009, 36 pp.

Molina L. *et al.*, 2010. An Overview of MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City Emissions and their Transport and Transformation. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU2010-12339-1, EGU General Assembly 2010. Disponible en la siguiente dirección: http://megapoli.dmi.dk/nlet/EGU10_SplinterMeeting_MILAGRO.pdf.

OCDE, 2011. Valuing Mortality Risk Reductions in Regulatory Analysis of Environmental, Health and Transport Policies: Policy Implications. OCDE, Paris, <http://www.oecd.org/env/tools-evaluation/48279549.pdf>.

OMS, 2006. Organización Mundial de la Salud. 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. Disponible en la siguiente dirección de Internet: http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?ua=1.

OMS, 2013. Sistema de consulta de la carga de enfermedades: Defunciones. Disponible en la Web: <http://apps.who.int/gho/data/#>.

Pope C.A., Burnett R. T., Thurston G. D., Thun M. J., Calle E. E., Krewski D., Godleski J. J., 2004. Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution-epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. 109: 71-77.

SEMADES, 2012. Secretaría de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable. Programa para mejorar la calidad del aire, Jalisco 2011-2020. SEMADES. 230 pp.

SEMARNAT, 2012. Inventario Nacional de Emisiones de México, 2005. SEMARNAT-Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. 174 pp.

SMA-DF, 2010. Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México. Contaminantes criterio 2010.

SMA-DF, 2012. Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2011. 1986-2011, 25 años de monitoreo atmosférico. SMA-DF. Publicación en formato electrónico disponible en la WEB: http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/informes/informe2011/descargas/informe_anual_calidad_aire_2011.pdf.

SPMARN-GNL, 2009. Subsecretaría de Protección al Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno de Nuevo León. Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey 2008-2012. Disponible en Web: http://www.nl.gob.mx/pics/pages/sdsustentable_ma_base/PROAIRE.pdf.

Valavanidis A., Fiotakis K., Vlachogianni T., 2008. Airborne particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms. Journal of Environmental Science and Health; 26(4):339-62.

Woodruff T. J., Darrow L. A., Parker J. D., 2008. Air pollution and postneonatal infant mortality in the United States, 1999–2002. Environmental Health Perspectives. 116(1):110–115.

Anexos metodológicos

Generalidades de las partículas suspendidas

Partículas suspendidas es el término general que describe a un grupo complejo de contaminantes que varían en composición y tamaño. Las partículas se consideran primarias cuando se liberan directamente al ambiente, y pueden ser de origen natural (volcanes, suelos, etc.) o antropogénico (vehículos, quema de biomasa, etc.). Las partículas secundarias son producidas por reacciones químicas en la atmósfera; por ejemplo, las partículas finas comúnmente se forman por reacciones atmosféricas a partir de óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno.

Para su estudio, las partículas se pueden dividir en tres fracciones de acuerdo con su tamaño: PM_{10} , partículas con un diámetro igual o menor a 10 micras (μm) (PM_{10}) conocidas también como fracción torácica; $PM_{2.5}$, partículas finas o fracción respiratoria con un diámetro igual o menor a $2.5 \mu m$ (ver, figura 10); y $PM_{0.1}$, partículas ultrafinas con un diámetro igual o menor a $0.1 \mu m$. El tamaño de las partículas es de gran importancia, tanto en términos de su comportamiento en la atmósfera, como en términos de su potencial de penetración en las viviendas y en los órganos de los seres vivos. Así, mientras más pequeñas son las partículas, pueden penetrar más profundamente en las vías respiratorias, hasta llegar a los pulmones. Inclusive, la proporción de la superficie de contacto es mayor con respecto a su volumen, con lo que aumenta la probabilidad de que la partícula entre en contacto con el organismo, incrementando los riesgos de daño a tejidos y órganos (Rojas-Bracho *et al.*, 2003).

Además, 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 (Bont *et al.*, 2004). Además, en comparación con las partículas más grandes, las $PM_{2.5}$ poseen una mayor área superficial (EC&HC, 2000), en la cual tienden a depositarse especies químicas dañinas para la salud humana, las cuales se distribuyen, dispersan y depositan con el viento.

Figura 10. Las $PM_{2.5}$ son entre 20 y 28 veces más pequeñas que el grosor de un cabello humano

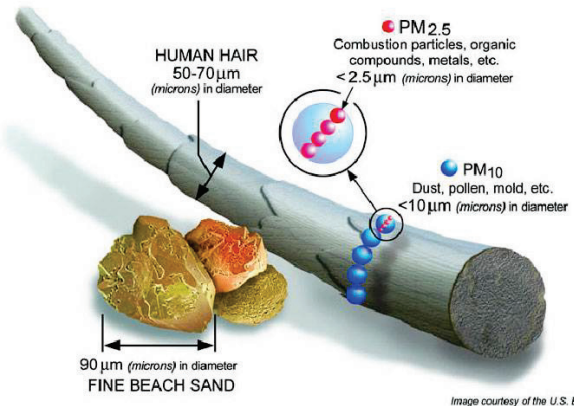


Image courtesy of the U.S. EPA

Descripción de las etapas metodológicas

Aplicación del modelo BenMAP

El modelo BenMAP (Environmental Benefits Mapping and Analysis Program) se encuentra disponible en la página de la EPA (Agencia para la Protección Ambiental de Estados Unidos).⁸ El modelo BenMAP es una herramienta de cómputo que estima los beneficios en la salud por el mejoramiento de la calidad del aire. Este modelo incluye un Sistema de Información Geográfica que permite realizar los cálculos de los impactos en la salud a un nivel de detalle espacial muy fino lo que permite mejorar la certidumbre de los resultados. Asimismo, esta herramienta facilita la sistematización de la información de insumos y resultados con lo que se reducen los errores humanos y se asegura su reproducibilidad.

El principal propósito de BenMAP es estimar los impactos en la salud y sus valores económicos asociados con los cambios de las concentraciones de la contaminación atmosférica. Esto se realiza mediante la utilización de las Funciones Exposición-Respuesta (FER) que asocian un cambio en la concentración de un contaminante con el cambio en un efecto en la salud. Las etapas que implican la estimación de la mortalidad prematura se esquematizan en la figura 11. A continuación se describirá cada una de las etapas conforme a la metodología seguida en este estudio.

Figura 11. Metodología general para la estimación de los impactos en la salud



Identificación de los impactos de las PM_{2.5}

Existe evidencia muy robusta sobre los impactos negativos en la salud a corto y largo plazo de las PM en estudios epidemiológicos y toxicológicos en todo el mundo. Los efectos más documentados son la mortalidad y la hospitalización de pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), exacerbación de los síntomas y aumento de la necesidad de terapia en asmáticos, mortalidad y hospitalización de pacientes con enfermedades cardiovasculares, mortalidad y hospitalización de pacientes con diabetes mellitus, aumento del riesgo de infarto al miocardio, inflamación de los pulmones, inflamación sistémica, disfunción endotelial y vascular, desarrollo de aterosclerosis, aumento en la incidencia de infecciones y cáncer de pulmón.

En estudios de cohorte se han investigado los impactos en la salud asociados con la exposición prolongada a las partículas. Aún cuando en México no se cuenta con estudios de este tipo, existen dos estudios importantes de largo plazo en Estados Unidos de América, que han arrojado datos sobre el riesgo relativo

⁸<http://www.epa.gov/air/benmap/>.

asociado con la mortalidad por enfermedades cardiovasculares, cardiopulmonares y por cáncer de pulmón. Estos estudios son el de las Seis Ciudades (*Six Cities*) (Dockery *et al.*, 1993) y el de la Sociedad Americana del Cáncer (ACS, por sus siglas en inglés).

En el estudio de las Seis Ciudades se analizó una cohorte prospectiva de más de 8 mil adultos durante aproximadamente 20 años, a partir de 1974, en seis ciudades del noreste de Estados Unidos, y se encontró una asociación robusta entre la exposición a las partículas y la mortalidad por cáncer pulmonar y por enfermedades cardiopulmonares, y la asociación más fuerte se encontró para las partículas finas.

Por otra parte, el estudio de la ACS incluyó el análisis de una cohorte retrospectiva formada desde 1982 con más de 500 mil adultos en 151 áreas metropolitanas de los 50 estados de Estados Unidos; se encontró una asociación entre la exposición a partículas y el incremento de la incidencia de síntomas respiratorios, el decremento de la función pulmonar y el incremento de la mortalidad por enfermedades cardiovasculares.

Ambos estudios fueron posteriormente reanalizados por un grupo independiente de investigación, y se han realizado más estudios analizando las bases de datos de la cohorte del estudio de la ACS. El análisis más reciente encontró estimadores de riesgo relativo ligeramente más elevados que los reportados en análisis anteriores de la misma cohorte. Algunos estudios han identificado esta asociación especialmente con la fracción fina de las partículas (INE-SEMARNAT, 2012).

Selección de la función exposición-respuesta (FER)

En este estudio se utilizaron las FER para PM_{2.5} con el mayor sustento científico reportadas en la literatura internacional, que incluyen los impactos en la salud por la exposición a largo plazo a este contaminante de estudios epidemiológicos de cohorte realizados en los Estados Unidos. En el cuadro 9 se presentan los impactos en la salud que fueron evaluados en este estudio y los coeficientes de riesgo relativo con sus respectivos intervalos de confianza del 95 % (IC 95 %). Asimismo, se presentan los intervalos de edad de la población considerada para cada impacto y su referencia en la bibliografía.

Cuadro 9. Impactos en la salud, intervalo de edad de la población, riesgos relativos y referencias

Impactos en la salud	Intervalo de edad de la población afectada (años)	Riesgo relativo (IC 95%) por 10 µg/m ³ de PM _{2.5}	Referencia
Mortalidad por enfermedades cardiovasculares	≥30	1.129 (1.04–1.23)	ACS y Seis ciudades. Estimador compuesto. (Stevens et al., 2008)
Mortalidad por cáncer de pulmón	≥30	1.151 (1.03–1.27)	ACS y Seis ciudades. Estimador compuesto. (Stevens et al., 2008)

Mortalidad por Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (EPOC)	≥30	1.09 (0.95, 1.26)	Lepeule et al., 2012
---	-----	-------------------	----------------------

Evaluación de la exposición

Concentraciones de PM_{2.5} base, 2010

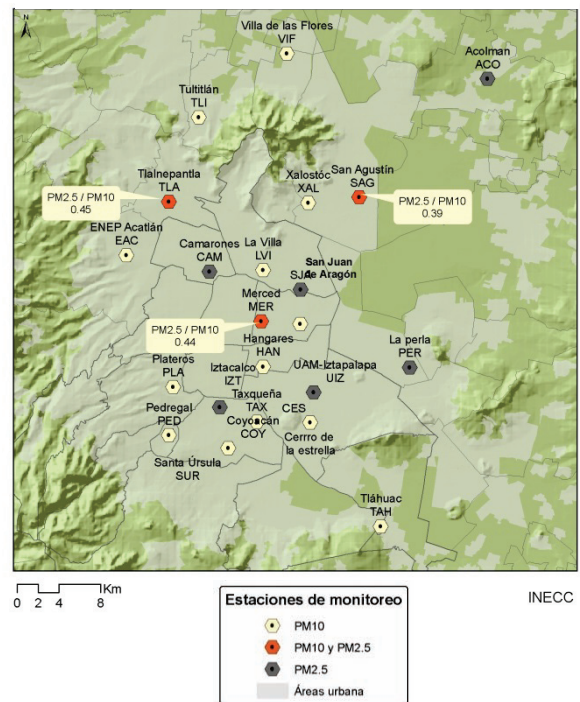
A continuación se presentan tres mapas con la localización geográfica de los monitores en las tres zonas metropolitanas, así como el contaminante que miden y la proporción de PM_{2.5} / PM₁₀ calculada en donde se miden las dos fracciones simultáneamente. Asimismo, un breve panorama del monitoreo de partículas suspendidas en cada ciudad.

Redes de monitoreo de partículas suspendidas

En el Valle de México se inició el monitoreo automático de las PM₁₀ en 1997 y de las PM_{2.5} en 2003.

En el presente estudio se tomaron en cuenta los datos de nueve monitores de PM_{2.5} y once que miden las PM₁₀, es decir, 20 monitores en total. Únicamente las estaciones de Tlalnepantla, San Agustín y Merced (símbolos en rojo) miden las dos fracciones simultáneamente (véase figura 12). Asimismo se presenta en la figura la proporción de PM_{2.5} / PM₁₀ que es de 0.441 (mediana, con un rango 0.395 a 0.453). Para mayor detalle de la configuración actual de las estaciones de monitoreo, así como de los contaminantes que se miden, consultar la página: <http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php>.

Figura 12. Ubicación de las estaciones que miden PM₁₀ y PM_{2.5} en Valle de México



En la ZM de Guadalajara se inició el monitoreo de las PM_{10} en 1993 y de las $PM_{2.5}$ en 2007.

En el presente estudio se tomaron en cuenta los datos de ocho monitores que miden las PM_{10} , y en dos de ellos se miden las $PM_{2.5}$. Únicamente las estaciones Centro y Miravalle (símbolos en rojo) miden las dos fracciones simultáneamente (ver, figura 13). Asimismo se presenta en la figura la proporción de $PM_{2.5} / PM_{10}$ que se calculó en dichas estaciones. Se utilizó la proporción de 0.52 obtenida en Centro porque los datos reportados en Miravalle fueron insuficientes. Para mayor detalle de la configuración actual de las estaciones de monitoreo, así como de los contaminantes que se miden, consultar la página: <http://siga.jalisco.gob.mx/aire/index.html>.

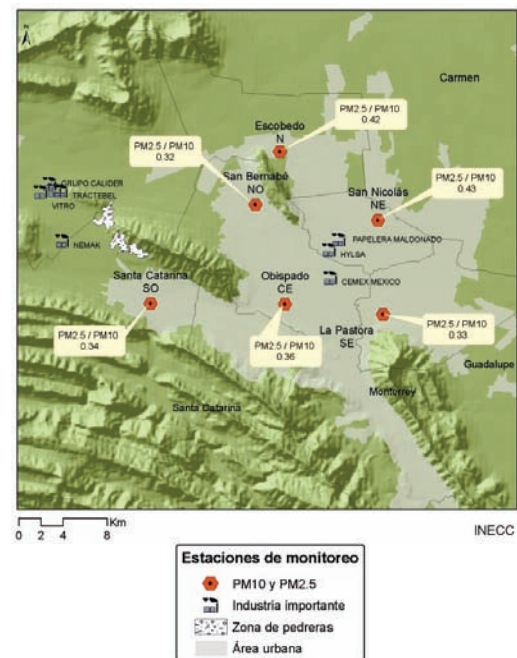
En el AM de Monterrey se inició el monitoreo de las PM_{10} en 2000 y de las $PM_{2.5}$ en 2007.⁹

En el presente estudio se tomaron en cuenta los datos de 6 monitores que miden simultáneamente las PM_{10} y las $PM_{2.5}$ (ver, figura 14). Por lo tanto, se calcularon los promedios anuales de los datos de estas 6 estaciones a partir de los promedios de 24 horas. Asimismo, se presenta en la figura 4, sólo con fines de comparación, la proporción de $PM_{2.5} / PM_{10}$ que presenta una mediana de 0.36 con un rango de 0.32 a 0.43. Para mayor detalle de la configuración actual de las estaciones de monitoreo, así como de los contaminantes que se miden, consultar la página: http://www.nl.gob.mx/?P=med_amb_mej_amb_si_ma.

Figura 13. Ubicación de las estaciones que miden PM_{10} y $PM_{2.5}$ en Guadalajara



Figura 14. Ubicación de las estaciones que miden PM_{10} y $PM_{2.5}$ en Monterrey



⁹ Para 2003 no hay suficiente información para construir el indicador anual para las $PM_{2.5}$

La distribución espacial de las concentraciones se realizó sobre la división geográfica de las AGEB¹⁰ (Áreas Geo-Estadísticas Básicas) reportada por el INEGI para el año 2010.¹¹ Estas AGEB constituyen la unidad fundamental del Marco Geoestadístico, el cual se ajusta, en lo posible, a los límites municipales y estatales de la división político-administrativa del país. Las AGEB tienen la ventaja de que se les puede asociar el número de habitantes. Esta peculiaridad representa una ventaja metodológica en el proceso de relacionar las concentraciones con la población porque se utiliza la misma configuración geográfica, evitando así posibles errores en el proceso del traslape espacial de la información.

En las figuras 15, 16 y 17 se presentan la representación espacial de las concentraciones de PM_{2.5} para cada ZM que resultó del modelo BenMAP.

Representación espacial de las concentraciones de las PM_{2.5}
Escenario base 2010

Figura 15. Distribución espacial de las concentraciones base en la ZMVM

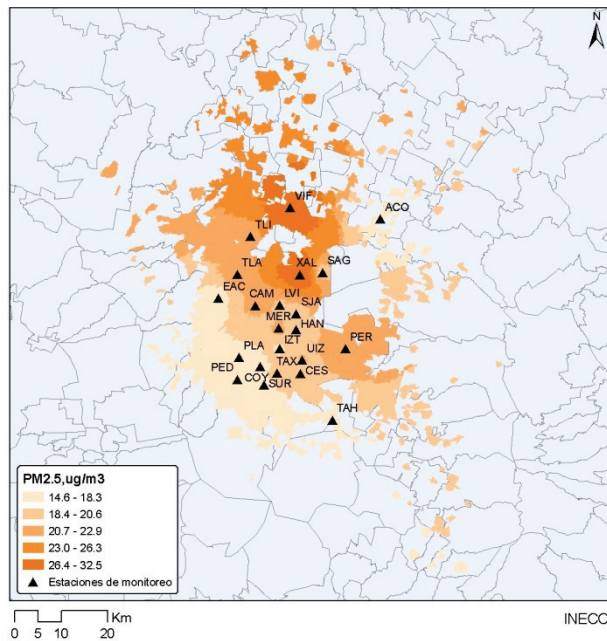
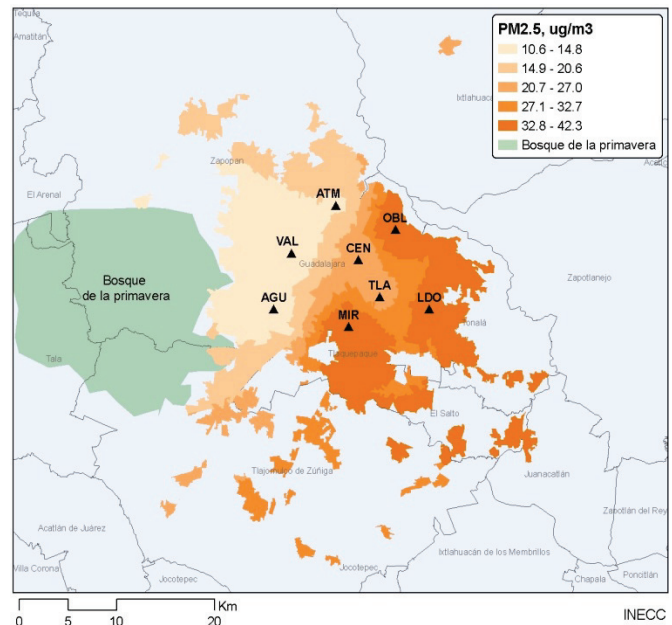


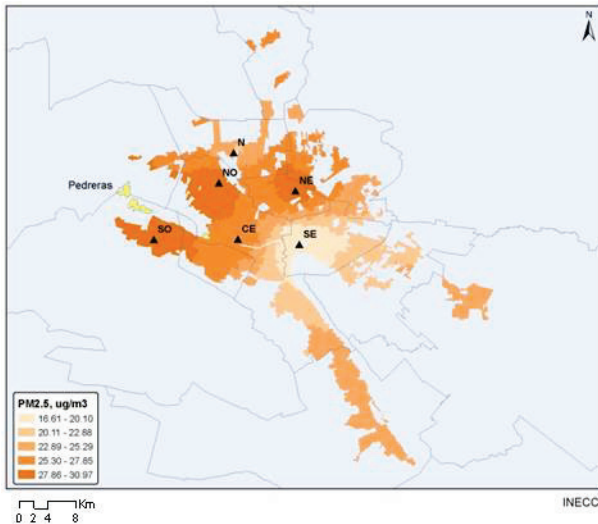
Figura 16. Distribución espacial de las concentraciones base en la ZMG



¹⁰ Unidad geográfica que subdivide los municipios o delegaciones que conforman el país.

¹¹ Fuente: INEGI, 2012. Archivos vectoriales en formato *shapefile* de las 4,525 localidades urbanas con actualización cartográfica correspondiente al cierre del Censo de Población y Vivienda 2010, organizadas por entidad federativa y a su interior por localidad urbana.

Figura 17. Distribución espacial de las concentraciones base en la AMM



- En el Valle de México se aprecia que las concentraciones más altas de las $PM_{2.5}$ se presentan en la zona norte de la ciudad y las más bajas en el suroeste.
- En la ZMG, las concentraciones más elevadas de $PM_{2.5}$ se presentan en las estaciones de Oblatos, Miravalle y Loma Dorada, localizadas al noreste, este y sureste, respectivamente.
- En el AMM, las concentraciones más elevadas se presentan en SO (suroeste), NO (noroeste) y NE (noreste), las más bajas en la estación SE (sureste), las siglas corresponden al área geográfica en la que se ubican las estaciones.

Población y características

En el cuadro 10 se presenta el intervalo de población considerado y la clasificación de las enfermedades que se utilizaron, para cada impacto en la salud.

Cuadro 10. Impactos estimados, edad de población afectada y claves CIE-10

Impactos en la salud	Intervalo de edad de la población afectada (años)	Muertes por causas específicas (clasificación CIE-10)
Mortalidad por enfermedades cardiovasculares	≥30	I10-I99
Mortalidad por cáncer de pulmón	≥30	C33-C34
Mortalidad EPOC	≥30	J40-J44, J47

En el cuadro 11 se presenta la población considerada en cada localidad (INEGI, 2013).

Cuadro 11. Población mayor de 30 años en cada zona metropolitana

Población	ZMVM	ZMG	AMM
Mayor de 30 años	10,875,040	2,195,974	2,151,015

En el cuadro 12 se presenta la población para las tres zonas metropolitanas de estudio y su correspondiente fracción respecto a la población nacional (INEGI, 2013).

Cuadro 12. Población en cada zona metropolitana, su suma y su fracción respecto a la población total

ZM	Población en 2010
Valle de México	20,116,842
Guadalajara	4,434,878
Monterrey	4,106,054
Población total en las tres zonas metropolitanas	28,657,774
Población total de México	112,336,538
Porcentaje (población de las ZM estudiadas/ población total de México)	25.5 %

Fuente: Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2010. Secretaría de Desarrollo Social,

Consejo Nacional de Población, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en la siguiente dirección de Internet: <http://www.inegi.org.mx/Sistemas/multiarchivos/doc/702825003884/DZM20101.pdf>

Datos de salud

Las tasas de incidencia de las tres mortalidades estudiadas se consultaron de la página del INEGI, específicamente del sistema de consulta interactiva de las bases de datos de mortalidad general¹² y en el caso de la población del Censo de Población y Vivienda 2010¹³.

Caracterización del impacto

Una vez que se seleccionó el contaminante (PM_{2.5}), los impactos a evaluar (mortalidad por tres causas específicas), las FER a utilizar, la caracterización de la población afectada y la reducción de la exposición de la población (escenario NOM y OMS), estos datos se utilizan como insumo para estimar los impactos evitados. Mediante la siguiente ecuación que se ilustra en la figura 18 (INE, 2012).

Figura 18. Cálculo de los casos de mortalidad evitable

Impactos en la salud

= ΔPM * β * Incidencia * Población

Cambio en la concentración anual de las PM _{2.5} (ug/m ³)	Porcentaje de cambio en el impacto en la salud debido a un cambio en la concentración de una unidad (%)	Información basal sobre la salud de la población. Tasas de incidencia (ej., defunciones/pob por año)	Características de la población (ej., estructura demográfica de la población)
--	---	--	---

Valoración económica de los impactos

Finalmente, el número de casos de los impactos evaluados se multiplica por el valor del impacto como se indica en la ecuación que se ilustra en la figura 19:

¹²http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/continuas/mortalidad/MortalidadGeneral.asp?s=est&c=11144&proy=mort_mg.

¹³http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/censos/cpv2010/PT.asp?s=est&c=27770&proy=cpv10_pt.

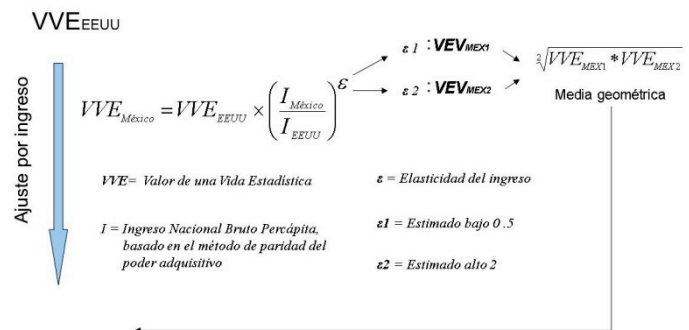
Figura 19. Cálculo de los beneficios monetarios

Beneficios monetarios
 = Impactos en la salud * pesos/ impactos en la salud

Número de casos del impacto en la salud (ej., casos de mortalidad)	Valor por el impacto en la salud (ej., valor estadístico de la vida)
--	--

El valor de una vida estadística (VVE) que se utilizó en este estudio fue de \$1.65 millones de dólares americanos de 2010. Dicho valor se estimó a partir de los resultados de un metanálisis realizado en Estados Unidos de América (Kochi, 2006) en el que se reporta un valor central de \$5.4 millones de dólares americanos (mda) del 2000 para una vida estadística de la población de EE.UU.; el valor central se ajustó a México a través del ingreso nacional per cápita basado en el método de

Figura 20. Ajuste del valor de una vida estadística para México



paridad del poder adquisitivo (OCDE, 2013) como se indica en la ecuación de la figura 20. Para tal estimación se ocuparon valores de elasticidad de 0.5 y 2, a fin de tener un escenario alto y bajo, y posteriormente se obtuvo la media geométrica de los resultados. Finalmente, el valor se ajustó a dólares de 2010, a través del índice de precios y cotizaciones de 1.27.¹⁴ Es importante decir que dicho valor se encuentra dentro del intervalo de valores sugeridos para los miembros de la OCDE (VVE, 1.45-4.35 mda) pero por debajo del valor central de 2.9 mda a precios del 2005 (OCDE, 2011).

¹⁴ <http://data.bls.gov/cgi-bin/cpicalc.pl?cost1=1.00&year1=2000&year2=2010>.

Días en los que se rebasa el límite de 24 h de la NOM

Días por arriba del límite de 24 h

<ul style="list-style-type: none"> • Durante el periodo de análisis (2004-2011) se han presentado continuamente días que rebasan el límite de 24 h establecido en la NOM-025. • La tendencia de los días que rebasan el límite de 24 h de Monterrey ha permanecido por arriba de las otras dos ZM. • En 2010 se presentaron 129, 64 y 21 días por arriba del límite de 24 h en el AMM, ZMVM y ZMG, respectivamente. • En 2011 se observa un aumento importante en el número de días en Monterrey y Guadalajara. 	<p>Figura 21. Número de días en los que se rebasa el límite de 24 h de la NOM de PM₁₀</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Año</th> <th>ZMVM</th> <th>ZMG</th> <th>AMM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2004</td> <td>40</td> <td>55</td> <td>125</td> </tr> <tr> <td>2005</td> <td>34</td> <td>51</td> <td>163</td> </tr> <tr> <td>2006</td> <td>50</td> <td>62</td> <td>149</td> </tr> <tr> <td>2007</td> <td>17</td> <td>17</td> <td>94</td> </tr> <tr> <td>2008</td> <td>45</td> <td>28</td> <td>116</td> </tr> <tr> <td>2009</td> <td>48</td> <td>13</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>2010</td> <td>64</td> <td>21</td> <td>129</td> </tr> <tr> <td>2011</td> <td>57</td> <td>131</td> <td>172</td> </tr> </tbody> </table>	Año	ZMVM	ZMG	AMM	2004	40	55	125	2005	34	51	163	2006	50	62	149	2007	17	17	94	2008	45	28	116	2009	48	13	85	2010	64	21	129	2011	57	131	172
Año	ZMVM	ZMG	AMM																																		
2004	40	55	125																																		
2005	34	51	163																																		
2006	50	62	149																																		
2007	17	17	94																																		
2008	45	28	116																																		
2009	48	13	85																																		
2010	64	21	129																																		
2011	57	131	172																																		
<ul style="list-style-type: none"> • En el caso de la PM_{2.5}, el valor ha variado año con año en Monterrey y Valle de México, desafortunadamente en Guadalajara solo se dispone de datos validados a partir de 2010. En este sentido llama la atención los 42 días registrados en 2011 para esta demarcación porque es el valor más alto para todo el periodo estudiado. • En 2010 se registraron 19, 14 y 6 días por arriba del límite de 24 h para AMM, ZMVM y ZMG, respectivamente. 	<p>Figura 22. Número de días en los que se rebasa el límite de 24 h de la NOM de PM_{2.5}</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Año</th> <th>ZMVM</th> <th>ZMG</th> <th>AMM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2004</td> <td>16</td> <td>17</td> <td>17</td> </tr> <tr> <td>2005</td> <td>17</td> <td>17</td> <td>17</td> </tr> <tr> <td>2006</td> <td>16</td> <td>16</td> <td>33</td> </tr> <tr> <td>2007</td> <td>5</td> <td>9</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>2008</td> <td>28</td> <td>16</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>2009</td> <td>6</td> <td>8</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>2010</td> <td>14</td> <td>19</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>2011</td> <td>9</td> <td>42</td> <td>15</td> </tr> </tbody> </table>	Año	ZMVM	ZMG	AMM	2004	16	17	17	2005	17	17	17	2006	16	16	33	2007	5	9	9	2008	28	16	16	2009	6	8	8	2010	14	19	6	2011	9	42	15
Año	ZMVM	ZMG	AMM																																		
2004	16	17	17																																		
2005	17	17	17																																		
2006	16	16	33																																		
2007	5	9	9																																		
2008	28	16	16																																		
2009	6	8	8																																		
2010	14	19	6																																		
2011	9	42	15																																		

Fuente: elaboración propia del INECC con información proveniente de los Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire.

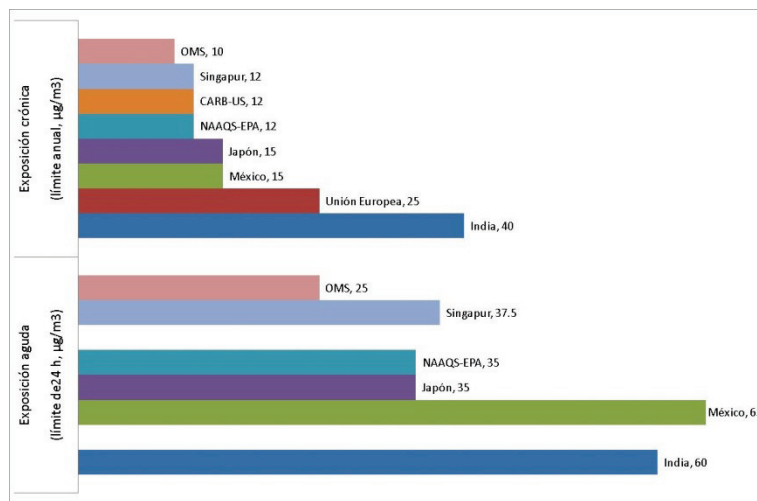
Normatividad nacional e internacional sobre las PM_{2.5}

En la figura 23 se presentan los límites anuales y de 24h de diferentes países del

mundo, así como los recomendados por la OMS. Los valores establecidos en la norma mexicana de partículas (NOM-025-SSA1-1993) están por arriba de las recomendaciones de la OMS, de Singapur, los de Estados Unidos y los de Japón. Cabe mencionar que la US-EPA a finales de 2012 actualizó el límite anual de las PM_{2.5} de 15 a 12 µg/m³; sin embargo el límite de 24 h de 35 µg/m³ permanece igual.

El valor límite de 24 h en México es el más laxo con respecto a los valores de otros países, e incluso por arriba del límite de la India.

Figura 23. Límites anuales y de 24 horas para las PM_{2.5} en diferentes países del mundo



En el cuadro 13 se presentan estos mismos límites a manera de cuadro, así como la referencia de dónde se obtuvieron.

Cuadro 13. Límites anuales y de 24 horas para las PM_{2.5} en diferentes países del mundo

País, región, localidad	Exposición aguda (límite de 24 h, µg/m ³)	Exposición crónica (límite anual, µg/m ³)	Referencia
OMS	25	10	http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf
NAAQS-EPA	35	12	http://www.epa.gov/pm/actions.html
CARB-US	--	12	http://www.arb.ca.gov/research/aqgs/pm/pm.htm#3
Singapur	37.5	12	http://app2.nea.gov.sg/news_detail_2012.aspx?news_sid=20120823135426553232
México	65	15	http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/nom-025-ssa1-1993.pdf
Japón	35	15	http://www.env.go.jp/en/air/aq/aq.html
Unión Europea	--	25	http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm
India	60	40	http://cpcb.nic.in/National_Ambient_Air_Quality_Standards.php

Municipios que conforman la ZMVM

Cuadro 14. Municipios que conforma la ZMVM

No.	Estado de México	No.	Distrito Federal	No.	Hidalgo
1	Acolman	1	Azcapotzalco	1	Tizayuca
2	Amecameca	2	Coyoacán		
3	Apaxco	3	Cuajimalpa de Morelos		
4	Atenco	4	Gustavo A. Madero		
5	Atizapán de Zaragoza	5	Iztacalco		
6	Atlautla	6	Iztapalapa		
7	Axapusco	7	La Magdalena Contreras		
8	Ayapango	8	Milpa Alta		
9	Chalco	9	Álvaro Obregón		
10	Chiautla	10	Tláhuac		
11	Chicoloapan	11	Tlalpan		
12	Chiconcuac	12	Xochimilco		
13	Chimalhuacán	13	Benito Juárez		
14	Coacalco de Berriozábal	14	Cuauhtémoc		
15	Cocotitlán	15	Miguel Hidalgo		
16	Coyotepec	16	Venustiano Carranza		
17	Cuautitlán				
18	Cuautitlán Izcalli				
19	Ecatepec de Morelos				
20	Ecatzingo				
21	Huehuetoca				
22	Hueyponxtla				
23	Huixquilucan				
24	Isidro Fabela				
25	Ixtapaluca				
26	Jaltenco				
27	Jilotzingo				
28	Juchitepec				
29	La Paz				
30	Melchor Ocampo				
31	Naucalpan de Juárez				
32	Nextlalpan				
33	Nezahualcóyotl				
34	Nicolás Romero				
35	Nopaltepec				
36	Otumba				
37	Ozumba				

38	Papalotla
39	San Martín de las Pirámides
40	Tecámac
41	Temamatla
42	Temascalapa
43	Tenango del Aire
44	Teoloyucan
45	Teotihuacán
46	Tepetlaoxtoc
47	Tepetlixpa
48	Tepetzotlán
49	Tequixquiac
50	Texcoco
51	Tezoyuca
52	Tlalmanalco
53	Tlalnepantla de Baz
54	Tonanitla
55	Tultepec
56	Tultitlán
57	Valle de Chalco Solidaridad
58	Villa del Carbón
59	Zumpango

Fuente:

http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/deli_mex05/DZMM_2005_0.pdf.

Referencias

INE, 2008. Estudio de evaluación socioeconómica de la reducción del contenido de azufre en Gasolina Magna y Pemex Diésel. Instituto Nacional de Ecología - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F. Reporte 91 pp.

INEGI, 2013. Promedio diario del salario base en 2010 de cotización al Instituto Mexicano del Seguro Social. Disponible en la siguiente dirección de internet: <http://www.inegi.org.mx/>.

INEGI, 2013. Sistema de consulta de datos iterativos de mortalidad y del Censo de Población y Vivienda de 2010. Disponibles en las siguientes direcciones de Internet: http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/continuas/mortalidad/MortalidadGeneral.asp?s=est&c=11144&proy=mort_mg.

INE-SEMARNAT, 2012. Guía para evaluar los impactos en la salud por la instrumentación de medidas de control de la contaminación atmosférica. INE. 78 pp.

Kochi I, Hubbell B, Kramer R., 2006. An empirical Bayes approach to combining and comparing estimates of the value of a statistical life for environmental policy analysis. *Environmental & Resource Economics* 34: 385-406.

OCDE, 2013. Organisation for Economic Co-operation and Development. Gross national income per capita 2010, Atlas method and PPP. Disponible en la siguiente dirección de Internet: <http://siteresources.worldbank.org/DATASTATISTICS/Resources/GNIPC.pdf>.

OMS, 2006. Air Quality Guidelines, Global Update 2005, Pages 484. Copenhagen, Denmark, World Health Organization.

Ostro BD, Rothschild S., 1989. Air pollution and acute respiratory morbidity—an observational study of multiple pollutants. *Environmental Research* 50: 694-702.

Ostro BD., 1987. Air pollution and morbidity revisited: a specification test. *Journal of Environmental Economics and Management*.14: 87-98.

Rojas-Bracho, L., y V. Garibay-Bravo, 2003. Partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles ¿hacen daño a la salud? ¿qué hacer?. *Gaceta Ecológica del Instituto Nacional de Ecología*, número 069:29-44.

Stevens, G. A., M. Zuk, L. Rojas Bracho y J. K. Hammitt. 2008. Capítulo 3 “The benefits and costs of reducing sulfur in Mexican diesel fuels”, de la tesis “Environment and health in transition in Mexico: risk assessment and economic evaluation”. Boston, Harvard School of Public Health.