



*** Versión preliminar para revisión externa
previa a su publicación final ***



“Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas”

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Instituto Nacional de Ecología

Western Governors' Association

2007

DR © Instituto Nacional de Ecología

Periférico sur 5000. Col. Insurgentes Cuicuilco.
C.P. 04530 México, D.F.

Coordinadores del documento:

Verónica Garibay Bravo.- Directora de Investigación sobre la Calidad del Aire,
Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional,
Instituto Nacional de Ecología

Georgina Echániz Pellicer.- Subdirectora de Estudios Estratégicos de la Calidad
del Aire, Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire, Dirección General
de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional, Instituto Nacional de
Ecología

Elaboración del documento (en orden alfabético)

José Andrés Aguilar Gómez, INE
Georgina Echániz Pellicer, INE
Porfirio Franco Sandoval, Consultor independiente
Verónica Garibay Bravo, INE
Rodolfo Iniestra Gómez, INE
John Allen Rogers, TSTES
Dzoara Tejeda Honstein, LT Consulting Group

Revisores (en orden alfabético)

Pendiente

ISBN: En trámite
Impreso y hecho en México

CONTENIDO

PREFACIO	7
ACRÓNIMOS Y SIMBOLOGÍA.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. LOS VEHÍCULOS AUTOMOTORES COMO FUENTES DE EMISIÓN	20
2.1. Procesos de emisión de los vehículos que circulan por carretera.....	20
2.1.1. Emisiones evaporativas	20
2.1.2. Emisiones por el tubo de escape.....	22
2.2. Contaminantes emitidos por las fuentes vehiculares y sus impactos en el medio ambiente y la salud.....	22
2.3. Importancia relativa de las emisiones de fuentes vehiculares.....	25
3. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES VEHICULARES	29
3.1. Número de unidades (NU).....	30
3.1.1. Tipos de vehículos	31
3.1.2. Fuentes de información	33
3.2. Datos de actividad (DA).....	36
3.2.1. Distribución por velocidad.....	37
3.2.2. Número de viajes por día.....	39
3.2.3. Uso del aire acondicionado	39
3.2.4. Fuentes de información	40
3.3. Factores de emisión (FE)	43
4.3.1. Técnicas directas para obtener factores de emisión	43
4.3.2. Técnicas indirectas para obtener factores de emisión.....	44
3.4. Otros factores a considerar	45
3.4.1. Datos de la localidad	45
3.4.2. Datos del inventario	46

4. MODELOS EMPLEADOS EN LA ELABORACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES VEHICULARES	47
4.1. Modelo MOBILE	47
4.1.1. Categorías vehiculares	48
4.1.2. Contaminantes.....	49
4.1.3. Insumos generales	50
4.2. Modelo MOVES	51
4.2.1. Categorías vehiculares	52
4.2.2. Contaminantes.....	53
4.2.3. Insumos generales	54
4.3. Modelo IVE	55
4.3.1. Categorías vehiculares	56
4.3.2. Contaminantes.....	58
4.3.3. Insumos generales	58
4.4. Modelo COPERT	59
4.4.1. Categorías vehiculares	59
4.4.2. Contaminantes.....	60
4.4.3. Insumos generales	61
4.5. Diferencias entre modelos	61
4.6. Conclusiones y sugerencias	62
5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DEL INVENTARIO	65
5.1. Incertidumbre en la información y herramientas.....	65
5.1.1. Incertidumbre asociada con el modelo de emisiones	66
5.1.2. Incertidumbre en los datos de entrada a un modelo de emisiones	68
a) <i>Parámetros con impacto crítico</i>	68
b) <i>Parámetros con impacto relevante</i>	69
c) <i>Parámetros con impacto menor</i>	70
5.2. Incertidumbre de un inventario por sus características	71

5.2.1. Precisión geográfica (granularidad).....	71
5.2.2. Nivel requerido de confianza	72
5.2.3. Precisión deseada en la magnitud.....	72
5.3. Criterios de evaluación cualitativa de un inventario de emisiones vehiculares	74
6. REPORTE DE UN INVENTARIO DE EMISIONES DE FUENTES VEHICULARES	79
6.1. Título.....	79
6.2. Agradecimientos	80
6.3. Índice	80
6.4. Resumen ejecutivo	81
6.5. Introducción	81
6.6. Características del inventario	82
6.7. Integración del inventario y actualización	83
6.7.1. Panorama general del proceso de desarrollo del inventario.....	84
6.7.2. Recopilación de datos.....	84
6.7.3. Metodología	85
6.7.4. Aseguramiento de calidad	85
6.8. Presentación de resultados	86
6.9. Análisis de resultados.....	86
6.10. Conclusiones y recomendaciones	87
6.11. Bibliografía.....	87
6.12. Apéndices	88
7. GLOSARIO.....	89
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadro 2-1. Principales contaminantes emitidos por los automóviles	22
Cuadro 2-2. Contribución porcentual de las emisiones vehiculares a las emisiones antropogénicas en diferentes ciudades o zonas metropolitanas de México	26
Cuadro 3-1. Homologación de categorías vehiculares del inventario de emisiones 2004 de la ZMVM con MOBILE6	33
Cuadro 4-1. Categoría vehiculares en MOBILE6	48
Cuadro 4-2. Contaminantes considerados en el modelo MOBILE6	49
Cuadro 4-3. Insumos demandados por MOBILE6	50
Cuadro 4-4. Categorías vehiculares en MOVES	52
Cuadro 4-5. Elementos considerados en la definición de subcategorías de fuente o bins en la caracterización de la flota vehicular en MOVES	53
Cuadro 4-6. Contaminantes considerados en las diferentes versiones de MOVES	54
Cuadro 4-7. Insumos demandados por MOVES	55
Cuadro 4-8. Criterios para definir las categorías vehiculares en IVE	57
Cuadro 4-9. Ejemplo de algunas categorías vehiculares en IVE	57
Cuadro 4-10. Contaminantes considerados en IVE	58
Cuadro 4-11. Insumos requeridos por IVE	58
Cuadro 4-12. Categorías vehiculares en COPERT	59
Cuadro 4-13. Elementos considerados en la definición de subcategorías en COPERT	60
Cuadro 4-14. Contaminantes considerados en COPERT	60
Cuadro 4-15. Insumos demandados por COPERT	61
Cuadro 4-16. Diferencias entre modelos	64
Cuadro 5-1. Matriz de evaluación cualitativa de un inventario de emisiones de fuentes móviles	75
Cuadro 5-2. Matriz de evaluación de un inventario de emisiones de mesoescala	78
Figura 2-1. Proceso de emisión de contaminantes en vehículos automotores	21
Figura 2-2. Emisiones por tipo de fuente antropogénica a nivel nacional (INEM, 1999)	25
Figura 2-3. Descripción de las definiciones de hidrocarburos	28
Figura 3-1. Factores de emisión promedio del parque vehicular para GOT, NOX y CO a diferentes velocidades	38

PREFACIO

Como parte del programa de capacitación en materia de inventarios de emisiones, el Instituto Nacional de Ecología (INE) presenta esta segunda guía ante autoridades, tanto federales como estatales, investigadores, consultores y otros usuarios interesados en la estimación de emisiones vehiculares. El objetivo de este nuevo instrumento es dar a conocer de manera general lo que son las emisiones vehiculares, su relevancia y los diversos métodos que existen para estimarlas.

La elaboración de la presente “Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas” fue posible gracias al esfuerzo y colaboración de muchos actores, entre ellos la Western Governors’ Association, the Sustainable Transport and Emissions Services Company y el Centro de Transporte Sustentable.

En este esfuerzo, las autoridades estatales de medio ambiente también contribuyeron de manera importante, al proporcionar información y como participantes activos en los eventos y talleres organizados por el Instituto Nacional de Ecología a lo largo de los cuatro años que tomó conformar esta guía. En particular, los gobiernos de Nuevo León, Morelos, Baja California y el Distrito Federal, proporcionaron comentarios de gran valor sobre el documento durante el taller de retroalimentación realizado por el INE en octubre de 2008.

Con esta publicación se aspira a guiar y orientar a usuarios con diferentes niveles de dominio sobre el tema con respecto a los conceptos básicos, la metodología y las fuentes de información preferidos y más comúnmente utilizados en la elaboración de inventarios de emisiones de fuentes móviles, así como sus ventajas y sus inconvenientes. También se incluyen recomendaciones sobre cómo documentar e interpretar los resultados de un inventario de emisiones de fuentes móviles. Los usuarios más experimentados podrán notar que esta guía no es exhaustiva (con el propósito de no confundir al público menos conocedor del tema) y, sin embargo, constituye una referencia muy completa sobre las herramientas y fuentes de información más comúnmente utilizadas en la estimación de emisiones de vehículos.

Por su parte, el “Manual para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas” que acompaña a esta guía trata con detalle el uso y las características de una herramienta en particular conocida como el modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE, por sus siglas en inglés). Este modelo tiene un amplio potencial de aplicación en México, por lo que el INE actualmente trabaja en su adaptación a las condiciones de diferentes ciudades en nuestro país.

Para una gestión de la calidad del aire bien fundamentada, se requieren inventarios de emisiones robustos, confiables, transparentes y comparables. La intención con esta guía es contribuir a lograr este objetivo en el mediano plazo y coadyuvar en el control de las fuentes de emisión que, como los vehículos, contribuyen más al deterioro de la calidad del aire en las zonas urbanas de nuestro país.

ACRÓNIMOS Y SIMBOLOGÍA

ACET	Acetaldehído
ACRO	Acroleína
BENZ	Benceno
BUTA	Butadieno
cc	Cilindrada
CCA	Comisión de Cooperación Ambiental de América del Norte
Cd	Cadmio
CICA	Centro de Información sobre Contaminación del Aire entre México y Estados Unidos
Cr	Cromo
CTS	Centro de Transporte Sustentable
Cu	Cobre
CFC o CFCs	Clorofluorocarbonos
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Bióxido de Carbono
CONM	Compuestos Orgánicos No Metano
COP	Contaminantes Orgánicos Persistentes
COPERT	Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport. Modelo europeo de estimación de emisiones vehiculares
COR	Compuestos Orgánicos Reactivos
COT	Compuesto Orgánicos Totales
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
EEA	Environmental European Agency (Agencia Ambiental Europea)
EPA (1998, 2004 y 2007)	Estándares que establecen los límites máximos permisibles de emisión para los vehículos nuevos a diesel con tecnología norteamericana con peso bruto vehicular mayor a 3,856 Kg.s.
EURO (I, II, III, IV y V)	Estándares que establecen los límites máximos permisibles de emisión para los vehículos nuevos vendidos en Europa.
FORM	Formaldehído
GLP	Gas Licuado de Petróleo

GNC	Gas Natural Comprimido
GONM	Gases Orgánicos No Metánicos
GOR	Gases Orgánicos Reactivos
GOT	Gases Orgánicos Totales
GSSR	Global Sustainable System Research (Investigación en sistemas globales sustentables)
HAP	Hidrocarburos Aromáticos Poli cíclicos
HC	Hidrocarburos
HCFC	Hidroclorofluorocarbonos
HCNM	Hidrocarburos No Metánicos
HCT	Hidrocarburos Totales
HDDBT	Diesel Transit and Urban Buses (Autobuses de transporte urbano e inter-urbano a diesel)
HDDV2b	Class 2b Heavy-Duty Diesel Vehicles (8,501-10,000 lbs. GVWR) (Vehículos pesados a diesel clase 2b (PBV de 3,856 a 4,536 Kg.))
HDDV3	Class 3 Heavy-Duty Diesel Vehicles (10,001-14,000 lbs. GVWR) (Vehículos pesados a diesel clase 3 (PBV > 4,536 a 6,350 Kg.))
HDDV6	Class 6 Heavy-Duty Diesel Vehicles (19,501-26,000 lbs. GVWR) (Vehículos pesados a diesel clase 6 (PBV > 8,845 a 11,794 Kg.))
HDDV7	Class 7 Heavy-Duty Diesel Vehicles (26,001-33,000 lbs. GVWR) (Vehículos pesados a diesel clase 7 (PBV > 11,794 a 14,969 Kg.))
HDDV8a	Class 8a Heavy-Duty Diesel Vehicles (33,001-60,000 lbs. GVWR) (Vehículos pesados a gasolina clase 8a (PBV > 14,969 a 27,216 Kg.))
HDDV8b	Class 8b Heavy-Duty Diesel Vehicles (>60,000 lbs. GVWR) (Vehículos pesados a diesel clase 8b (PBV > 27,216 Kg.))
HDGV2b	Class 2b Heavy-Duty Gasoline Vehicles (8,501-10,000 lbs. GVWR) (Vehículos pesados a gasolina clase 2b (PBV > 3,856 a 4,536 Kg.))
HDGV3	Class 3 Heavy-Duty Gasoline Vehicles (10,001-14,000 lbs. GVWR) (Vehículos pesados a gasolina clase 3 (PBV > 4,536 a 6,350 Kg.))
HDGV6	Class 6 Heavy-Duty Gasoline Vehicles (19,501-26,000 lbs. GVWR) (Vehículos pesados a gasolina clase 6 (PBV > 8,845 a 11,794 Kg.))
HDGV7	Class 7 Heavy-Duty Gasoline Vehicles (26,001-33,000 lbs. GVWR) (Vehículos pesados a gasolina clase 7 (PBV > 11,794 a 14,969 Kg.))

HDGV8a	Class 8a Heavy-Duty Gasoline Vehicles (33,001-60,000 lbs. GVWR) (Vehículos pesados a gasolina clase 8a (PBV > 14,969 a 27,216 Kg.))
HFC	Hidrofluorocarbonos
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEM	Inventario Nacional de Emisiones
ISSRC	International Sustainable System Research Center (Centro Internacional de Investigación en Sistemas Sustentables)
IVE	International Vehicle Emission Model (Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares)
KRV	Kilómetros Recorridos por Vehículo
LDDT12	Light-Duty Diesel Trucks 1 and 2 (0-6,000 lbs. GVWR) (Camiones ligeros a diesel 1 y 2 (PBV de 0 a 2,722 Kg.))
LDDT34	Light-Duty Diesel Trucks 3 and 4 (6,001-8,500 lbs. GVWR) (Camiones ligeros a diesel 3 y 4 (PBV > 2,722 a 3856 Kg.))
LDDV	Light-Duty Diesel Vehicles (Passenger Cars) (Vehículos ligeros diesel (vehículos de pasajeros))
LDGT1	Light-Duty Gasoline Trucks 1 (0-6,000 lbs. GVWR, 0-3,750 lbs. LVW) (Camiones ligeros a gasolina 1 (PBV* de 0 a 2,722 Kg.; PP** de 0 a 1,701 Kg.))
LDGT2	Light-Duty Gasoline Trucks 2 (0-6,000 lbs. GVWR, 3,751-5,750 lbs. LVW) (Camiones ligeros a gasolina 2 (PBV de 0 a 2,722 Kg.; PP > 1,701 a 2,608 Kg.))
LDGT3	Light-Duty Gasoline Trucks 3 (6,001-8,500 lbs. GVWR, 0-5,750 lbs. ALVW) (Camiones ligeros a gasolina 3 (PBV > 2,722 a 3,856 Kg.; PPA*** de 0 a 2,608 Kg.))
LDGV	Light-Duty Diesel Trucks 3 and 4 (6,001-8,500 lbs. GVWR) (Vehículos ligeros a gasolina (autos de pasajeros))
MC	Motocicletas
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MOBILE	Modelo para el cálculo de factores de emisión de vehículos automotores de la EPA

MOVES	Motor Vehicle Emission Simulator (Simulador de emisiones vehiculares)
MTBE	Metil Ter Butil Eter
N ₂ O	Óxido nitroso
NARSTO	North American Research Strategy for Tropospheric Ozone (Estrategia de Investigación sobre Ozono Troposférico en América del Norte)
NH ₃	Amoniaco
NH ₄ NO ₃	Nitrato de amonio
(NH ₄) ₂ SO ₄	Sulfato de amonio
Ni	Níquel
NO	Monóxido de nitrógeno
NO ₂	Bióxido de nitrógeno
NONROAD	Modelo de estimación de emisiones proveniente de vehículos automotores que operan fuera de camino.
NOx	Óxidos de nitrógeno
OTAQ	Office of Transport and Air Quality (Oficina de Transporte y Calidad del Aire de la EPA)
Pb	Plomo
PBV	Peso Bruto Vehicular
PFC	Perfluorocarbono
PM	Partículas, también referido como material particulado
PM10	Partículas de diámetro aerodinámico menor a 10 micras
PM2.5	Partículas de diámetro aerodinámico menor a 2.5 micras
PP	Peso de Prueba
PPA	Peso de Prueba Alternativo
PROAIRE	Programa de Mejoramiento de la Calidad del Aire
Se	Selenio
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SO ₂	Bióxido de azufre
SUV	Sport Utility Vehicle (Vehículo utilitario)
Tier (I y II)	Estándares que establecen los límites máximos permisibles de emisión para los vehículos nuevos a gasolina con tecnología

	norteamericana.
UCR	Universidad de California en Riverside
ULEV	Ultra Low Emission Vehicle (Vehículo de ultra baja emisión)
UNFCCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático
USEPA	United States, Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos)
VIN	Número de Identificación Vehicular
VMT	Vehicle Miles Traveled (Millas Recorridas por Vehículo)
WGA	Western Governors' Association (Asociación de Gobernadores del Oeste de los Estados Unidos)
ZMG	Zona Metropolitana de Guadalajara
ZMM	Zona Metropolitana de Monterrey
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
ZMVP	Zona Metropolitana del Valle de Puebla
ZMVT	Zona Metropolitana del Valle de Toluca
Zn	Zinc

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica en México es un problema casi generalizado en las grandes zonas urbanas; sin embargo, en los últimos años el gran crecimiento demográfico e industrial, aunado al incremento en la flota vehicular y en el consumo de combustibles, ha traído consigo la extensión de este problema a otras zonas del país, lo que implica que cada vez más personas viven en ciudades donde están expuestas a una mala calidad del aire. Esto cobra importancia si se toma en cuenta que diversos estudios llevados a cabo en México han identificado una asociación entre la contaminación atmosférica, en particular por partículas y ozono, y el aumento en las visitas a salas de emergencia por ataques de asma (Romieu et al., 1995; Rosas et al., 1998), la incidencia de infecciones respiratorias (Tellez-Rojo et al., 1997; Torres-Meza, 2000; Hernandez-Cadena et al, 2000), los casos de bronquitis crónica (Romano, 2000), el ausentismo escolar (Romieu et al., 1992), la presencia de síntomas respiratorios (Sánchez Costanza, 1999), así como la disminución de la función pulmonar en niños (Castillejos et al., 1992 y 1995; Gold et al, 1999), la reducción en la variabilidad cardíaca (Holguin et al., 2003), y un incremento en la mortalidad en adultos (Borja-Aburto et al., 1998; Castillejos et al., 2000; Tellez-Rojo et al, 2000; O'Neill et al., 2004) e infantes (Loomis et al., 1999).

La contaminación del aire resulta de una compleja mezcla de miles de fuentes, desde las chimeneas industriales y los vehículos automotores hasta el uso individual de productos de aseo, limpiadores domésticos y pinturas; incluso la vida animal y vegetal puede jugar un papel importante en el problema de la contaminación. Es por ello que existen varias recomendaciones generales que intentan atender los problemas de contaminación atmosférica para mega-ciudades (Mage, D. et. al., 1996; Plaut, P. 1998 y; Fu, L. et al., 2001). No obstante, un requisito previo para el diseño e implementación de medidas de control y abatimiento es la creación de un inventario de emisiones con un alto nivel de desagregación espacial y temporal.

Un inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos es un instrumento estratégico de gestión ambiental que permite identificar a los agentes generadores de emisiones, así como los tipos de contaminantes que emite cada uno y su aporte a la atmósfera, permitiendo así guiar las intervenciones o medidas de control de manera eficiente.

Entonces, es necesario realizar un inventario de emisiones como punto de partida en el diseño de cualquier programa de mejoramiento de la calidad del aire, ya que es una herramienta adecuada para (INE-SEMARNAT, 2005):

- Identificar y jerarquizar la contribución de diferentes fuentes a las emisiones totales;
- Identificar los principales contaminantes emitidos en un área de interés;
- Determinar los efectos de las medidas de control en las tasas de emisión de una región;
- Estimar los efectos de las emisiones atmosféricas en la calidad del aire a través de estudios de modelación;
- Identificar posibles medidas de reducción de emisiones;
- Apoyar el establecimiento de programas de intercambio de emisiones; y
- Determinar las tendencias en los niveles de emisión.

Es claro que los inventarios de emisiones pueden apoyar, de manera eficiente, muchas actividades sobre control y regulación de emisiones. Sin embargo, si se basan en información incompleta, errónea o poco confiable, esto puede tener graves consecuencias en términos de costos y eficacia para el control de las emisiones contaminantes. Una evaluación reciente sobre el estado actual de los inventarios de emisiones en Canadá, Estados Unidos y México (NARSTO, 2005), concluyó que a pesar de los avances logrados en los últimos años en los tres países, los inventarios de emisiones poseen debilidades y deficiencias considerables que exigen un esfuerzo adicional para ser atendidas.

En el caso de México el plan de acción inicial para mejorar los inventarios de emisión contempla, entre otras cosas, crear y extender la capacidad de las autoridades ambientales para elaborar inventarios de emisiones. Así, el Instituto Nacional de Ecología ha desarrollado, desde hace más de una década, diversos proyectos enfocados a la generación de herramientas que ayuden a los sectores interesados a elaborar inventarios de emisiones cada vez más confiables. En 1995, en colaboración con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA, por sus siglas en inglés) y la Asociación de Gobernadores del Oeste (WGA, por sus siglas en inglés), también de los Estados Unidos, el INE llevó a cabo el *Proyecto de Inventarios de Emisiones para México* (Radian, 1997), el cual tuvo como objetivo fundamental

proporcionar las herramientas básicas necesarias para la planeación, desarrollo y actualización de los inventarios de emisiones contaminantes a la atmósfera y el propio desarrollo del primer inventario nacional de emisiones. Como resultado, se publicaron ocho manuales que contienen metodologías generales para la elaboración de inventarios de emisiones a la atmósfera y que actualmente están actualmente disponibles en las páginas electrónica del INE (www.ine.gob.mx) y del Centro de Información sobre Contaminación del Aire para la Frontera entre Estados Unidos y México (CICA) (www.epa.gov/ttn/catc/cica).

Posteriormente, en el año 2005 el INE en colaboración con la WGA publicó la *Guía de elaboración y uso de inventarios de emisiones para México* (INE-SEMARNAT 2005), la cual integra cuatro de los ocho manuales que originalmente formaron parte del *Proyecto de Inventarios de Emisiones para México*, (volúmenes I, II, III y VIII). Además, se continúa con la elaboración de una serie de guías metodológicas para la elaboración y usos de inventarios de emisiones de fuentes específicas, que puedan ser aplicadas en todo el país por las autoridades locales, estatales y federales para la estimación de emisiones que sean consistentes y que faciliten en un futuro cercano la integración y actualización de inventarios de emisiones a escala local, regional y nacional. El objetivo de este nuevo material es integrar, adaptar y actualizar los manuales anteriores para facilitar la homologación de los esfuerzos desarrollados a nivel nacional para la elaboración, mantenimiento y actualización de inventarios de emisiones en México.

Así mismo, en el año 2006 y gracias al apoyo brindado por la USEPA, la WGA y la CCA, se publicó el *Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999 -INEM, 1999-*, (INE-SEMARNAT, 2006), el cual fue desarrollado de manera conjunta por el INE y la Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. El INEM, 1999 es el primer inventario de emisiones a nivel nacional en la historia de México y uno de los resultados más importantes que derivaron de este primer inventario fue la identificación de diversas áreas de oportunidad, tales como:

- Mejorar la cobertura y calidad de la información usada para estimar las emisiones de las distintas fuentes a diferentes niveles de resolución espacial y temporal.
- Reducir la incertidumbre en la estimación de emisiones en las diferentes categorías de fuente.

- Establecer prioridades, por fuente de emisión, para la formulación de factores de emisión y datos de actividad específicos para México.
- Reforzar la capacidad institucional a nivel federal, estatal y municipal para fomentar la adecuada aplicación de las metodologías de estimación de emisiones.
- Elaborar y publicar guías y directrices para la homologación de los inventarios locales y nacionales de emisiones.
- Para el caso específico de las fuentes móviles:
 - Recopilar e integrar modelo de demanda de transporte
 - Realizar estudios sobre actividad vehicular por ciudad
 - Contar con pruebas vehiculares adicionales para determinar factores de emisión base
 - Mejorar la información sobre características del parque vehicular

En atención a estas limitaciones, y considerando la importancia y la magnitud de las emisiones generadas por las fuentes vehiculares, durante el año 2006 el INE llevó a cabo, en colaboración con el Centro de Transporte Sustentable (CTS), los estudios denominados *Taller sobre emisiones vehiculares* (INE-CTS, 2006a) y *Diagnóstico nacional sobre inventarios de emisiones de fuentes móviles* (INE-CTS, 2006b). Estos estudios tuvieron como objetivo primordial hacer un diagnóstico sobre la información y las herramientas utilizadas para estimar los inventarios de emisiones de fuentes vehiculares en el país. A partir de ello, se planeó el desarrollo y diseño de una nueva guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes vehiculares, que atendiera las necesidades tanto de homologar los inventarios de emisiones locales como de fomentar la adecuada aplicación de las metodologías de estimación de emisiones, acorde con las capacidades técnicas y de información disponibles.

Entre los resultados más significativos de los estudios antes mencionados destaca que:

- A excepción del Distrito Federal, ninguna entidad de la República cuenta con un inventario de emisiones de fuentes vehiculares que cubra todo su territorio,
- No existe un conocimiento detallado sobre los métodos de elaboración y usos de los inventarios de emisiones de fuentes móviles. Por ejemplo, sólo nueve entidades federativas tienen experiencia en la elaboración de inventarios de

- emisiones de fuentes vehiculares y de ellas sólo tres han realizado actualizaciones sistemáticas de sus inventarios al menos para alguna ciudad dentro de su territorio,
- Los inventarios de fuentes móviles que existen actualmente han sido desarrollados con diferentes modelos, lo que dificulta su comparación. Por ejemplo, mientras en unos inventarios se usó el modelo de factores de emisión llamado MOBILE5, en otros se usaron las versiones MOBILE6 ó MOBILE6-México, generando datos distintos debido a las características de cada uno de ellos,
 - En su mayoría, los inventarios elaborados como parte de los PROAIRE muestran diferencias significativas, entre sí y con el Inventario Nacional de Emisiones, 1999; por ejemplo, distintos años base, divergencias en la caracterización de los contaminantes (los hidrocarburos reportados como hidrocarburos totales en unos inventarios o como compuestos orgánicos volátiles en otros), divergencias en la caracterización de la flota vehicular (por ejemplo, diferente número y denominación de categorías vehiculares) y distintos dominios geográficos (por ejemplo, zonas metropolitanas versus municipios), entre otros,
 - Las fuentes de información y los métodos empleados para caracterizar la flota vehicular y estimar su actividad y factores de emisión (todos ellos elementos indispensables para estimar un inventario de emisiones), son generalmente variados y en algunos casos incompletos, inadecuados y/o insuficientes, y;
 - No existen procedimientos estandarizados de control de calidad, ni manejo de la incertidumbre asociada con la elaboración de los inventarios de emisiones.

Es así que la presente guía, denominada *Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Vehiculares en Ciudades Mexicanas*, tiene por objeto poner a disposición de las autoridades locales, estatales y federales, responsables de la elaboración de inventarios de emisiones, así como de instituciones académicas y de investigación, una herramienta que permita homologar los procedimientos para la elaboración y actualización de inventarios de emisiones vehiculares en el país. Es importante destacar que esta guía se refiere sólo a emisiones del escape de vehículos automotores en circulación, ya que las fuentes móviles que no circulan por vías y carreteras (tractores agrícolas, palas mecánicas, grúas y equipo de construcción), así como otras fuentes de emisión móviles (aeronaves, locomotoras, embarcaciones), serán consideradas en otra guía. Así mismo, detalles sobre los diversos usos de los inventarios de emisiones y el tema de preparación

de inventarios para modelación y otros temas generales sobre inventarios ya han sido cubiertos por la “Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones”.

El contenido de esta guía se organiza de la siguiente manera: El Capítulo 2 brinda información general sobre los procesos de emisión de los vehículos, los tipos de contaminantes que generan y su importancia relativa, a nivel urbano y nacional, en México. El Capítulo 3 presenta la metodología general utilizada para estimar un inventario de emisiones de fuentes vehiculares, así como sobre los insumos necesarios para su aplicación. El Capítulo 4 describe cuatro herramientas de modelación empleadas en la elaboración de inventarios de emisiones vehiculares: MOBILE6, MOVES, COPERT e IVE. El Capítulo 5 cubre conceptos generales sobre la calidad del inventario y ofrece herramientas de orientación sobre evaluación cualitativa y cuantitativa del inventario. El Capítulo 6 describe el contenido mínimo a considerar en la elaboración de un reporte sobre un inventario de emisiones de fuentes vehiculares, y finalmente, el Capítulo 7 presenta un glosario en el que se definen algunos de los términos técnicos más importantes usados a lo largo de los capítulos anteriores.

Esta guía se complementa con el *Manual para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas*, en el que se abunda en el uso de uno del Modelo IVE y se proporciona información sobre cómo utilizar el modelo en diferentes ciudades, dependiendo el grado de avance en la generación de información local con que se cuente. Este modelo está siendo actualmente utilizado y alimentado con información generada por el INE a través de estudios y mediciones en diversas ciudades.

Es así que, el INE presenta la *Guía metodológica de estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas* y el *Manual para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas*, con la finalidad de proporcionar elementos básicos para estandarizar los procesos de elaboración de inventarios de emisiones vehiculares y con ello fomentar su integración, desarrollo y actualización de manera uniforme y homogénea en el país.

2. LOS VEHÍCULOS AUTOMOTORES COMO FUENTES DE EMISIÓN

Esta guía se enfoca en la estimación de las emisiones provenientes del escape de los vehículos automotores, tales como motocicletas, vehículos de pasajeros, camiones y autobuses, todos ellos diseñados para circular en la vía pública. Por lo general las emisiones de una sola unidad, de cualquiera de estos vehículos, son muy bajas comparadas con las emisiones de una chimenea industrial. Sin embargo, debido a la cantidad de vehículos en circulación, en muchas ciudades representan la fuente principal de contaminación. Conducir un vehículo de pasajeros privado es quizás la actividad diaria más "contaminante" que el ciudadano común realiza y, a diferencia de las chimeneas industriales, es prácticamente imposible medir las emisiones de cada uno de ellos; por lo tanto, se necesita utilizar herramientas distintas y especializadas para estimar las emisiones de estas fuentes móviles.

En las siguientes secciones de este capítulo se brinda información general sobre los procesos de emisión de los vehículos, ya que las emisiones del escape no nos las únicas que existen, se detallan también los tipos de contaminantes que generan y su importancia relativa a nivel urbano y nacional en México.

2.1. Procesos de emisión de los vehículos que circulan por carretera

Los vehículos automotores propulsados por motores de combustión interna producen, en general, dos tipos de emisiones de gases contaminantes: a) emisiones evaporativas y b) emisiones por el tubo de escape (Figura 2-1).

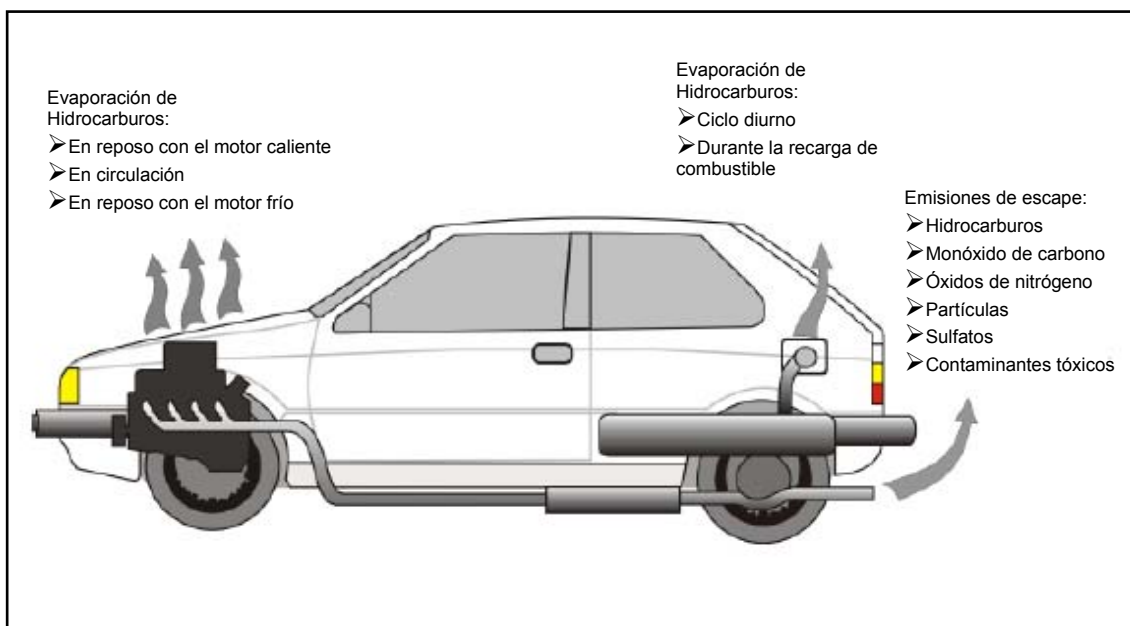
2.1.1. Emisiones evaporativas

Las emisiones causadas por la evaporación de combustible pueden ocurrir cuando el vehículo está estacionado y también cuando está en circulación; su magnitud depende de las características del vehículo, factores geográficos y meteorológicos, como la altura y la

temperatura ambiente y, principalmente, de la presión de vapor del combustible. La variedad de procesos por los que se presentan emisiones evaporativas en los vehículos incluye:

- Emisiones diurnas: Son generadas en el sistema de combustible del vehículo debido a los cambios de temperatura a través de las 24 horas del día.
- Emisiones del vehículo recién apagado con el motor caliente: Se presentan una vez que se apaga el motor, debido a la volatilización del combustible por su calor residual.
- Emisiones evaporativas en circulación: Se presentan cuando el motor está en operación normal.
- Emisiones evaporativas del vehículo en reposo con el motor frío: Ocurren principalmente debido a la permeabilidad de los componentes del sistema de combustible.
- Emisiones evaporativas durante el proceso de recarga de combustible: Consisten de fugas de vapores del tanque de combustible durante el proceso de recarga; se presentan mientras el vehículo está en las estaciones de servicio y para efectos de inventarios de emisiones, son tratadas típicamente como fuente de área.

Figura 2-1. Proceso de emisión de contaminantes en vehículos automotores



2.1.2. Emisiones por el tubo de escape

Las emisiones por el tubo de escape son producto de la quema del combustible (sea éste gasolina, diesel u otros como gas licuado o biocombustibles) y comprenden a una serie de contaminantes tales como: el monóxido y bióxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y las partículas. Además, ciertos contaminantes presentes en el combustible como el azufre y, hasta hace algunos años, el plomo se liberan al ambiente a través del proceso de combustión. Las emisiones por el tubo de escape dependen de las características del vehículo, su tecnología y su sistema de control de emisiones; los vehículos más pesados o más potentes tienden a generar mayores emisiones por kilómetro recorrido y las normas que regulan la construcción de vehículos determinan tanto su tecnología así como la presencia o ausencia de equipos de control de emisiones, como los convertidores catalíticos. El estado de mantenimiento del vehículo y los factores operativos, tanto como la velocidad de circulación, la frecuencia e intensidad de las aceleraciones y las características del combustible (como su contenido de azufre) juegan un papel determinante en las emisiones por el escape.

2.2. Contaminantes emitidos por las fuentes vehiculares y sus impactos en el medio ambiente y la salud

La gasolina y el diesel son mezclas, principalmente, de hidrocarburos, compuestos que contienen átomos de hidrógeno y carbono. Si la combustión en un motor fuera perfecta, el oxígeno en el aire convertiría todo el hidrógeno del combustible en agua y todo el carbono en dióxido de carbono. En la realidad, el proceso de combustión no es perfecto y, en consecuencia, los motores de los automóviles emiten varios tipos de contaminantes. En el Cuadro 2-1 se muestran algunos de los contaminantes que son emitidos por las fuentes vehiculares.

Cuadro 2-1. Principales contaminantes emitidos por los automóviles

Tipo de emisión	Contaminantes emitidos
Por el tubo de escape	Hidrocarburos, Monóxido de carbono, Óxidos de nitrógeno Partículas, Bióxido de carbono, Bióxido de azufre, Plomo (sólo en el caso de gasolinas con plomo), Amoniac y Metano
Evaporativas	Hidrocarburos

A continuación se describen de manera muy breve su importancia específicamente en términos de sus impactos en la salud y el ambiente (INE-SEMARNAT, 2005):

- Hidrocarburos (HC): Las emisiones de hidrocarburos resultan cuando no se quema completamente el combustible en el motor. Existe una gran variedad de hidrocarburos emitidos a la atmósfera y de ellos los de mayor interés, por sus impactos en la salud y el ambiente, son los compuestos orgánicos volátiles (COV). Estos compuestos son precursores del ozono y algunos de ellos, como el benceno, formaldehído y acetaldehído, tienen una alta toxicidad para el ser humano.
- Monóxido de carbono (CO): El monóxido de carbono es un producto de la combustión incompleta y ocurre cuando el carbono en el combustible se oxida sólo parcialmente. El monóxido de carbono se adhiere con facilidad a la hemoglobina de la sangre y reduce el flujo de oxígeno en el torrente sanguíneo ocasionando alteraciones en los sistemas nervioso y cardiovascular.
- Óxidos de nitrógeno (NOx): Bajo las condiciones de alta temperatura y presión que imperan en el motor, los átomos de nitrógeno y oxígeno del aire reaccionan para formar monóxido de nitrógeno (NO), bióxido de nitrógeno (NO₂) y otros óxidos de nitrógeno menos comunes, que se conocen de manera colectiva como NOx. Los óxidos de nitrógeno, al igual que los hidrocarburos, son precursores de ozono. Así mismo, con la presencia de humedad en la atmósfera se convierten en ácido nítrico, contribuyendo de esta forma al fenómeno conocido como lluvia ácida. La exposición aguda al NO₂ puede incrementar las enfermedades respiratorias, especialmente en niños y personas asmáticas. La exposición crónica a este contaminante puede disminuir las defensas contra infecciones respiratorias.
- Bióxido de azufre (SO₂): El SO₂ es un gas incoloro de fuerte olor, que se produce debido a la presencia de azufre en el combustible. Al oxidarse en la atmósfera produce sulfatos, que forman parte del material particulado. Este compuesto es irritante para los ojos, nariz y garganta, y agrava los síntomas del asma y la bronquitis. La exposición prolongada al bióxido de azufre reduce el funcionamiento pulmonar y causa enfermedades respiratorias.

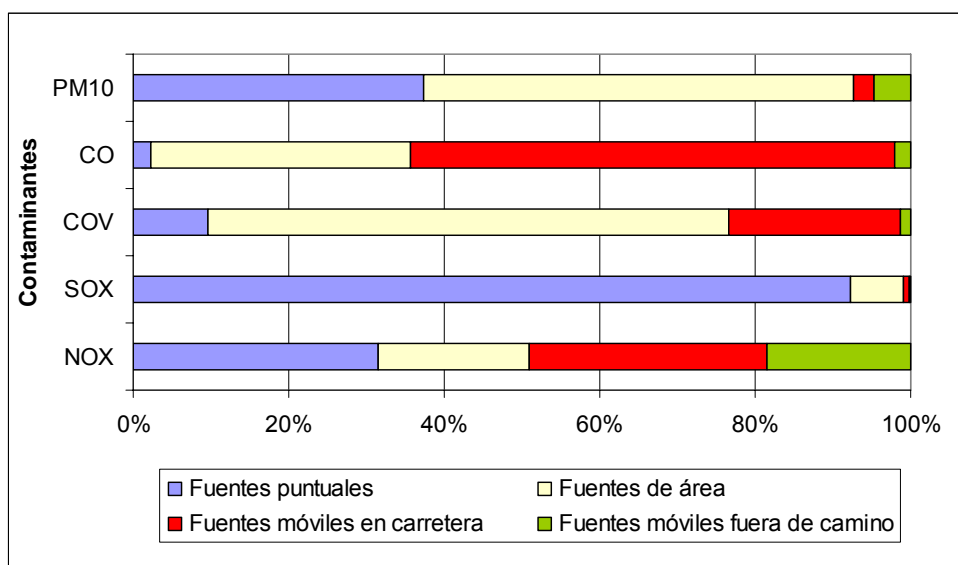
- Partículas (PM): Las partículas también son producto de los procesos de combustión en el motor de los vehículos. Este contaminante es uno de los que tiene mayores impactos en la salud humana; ha sido asociado con un aumento de síntomas de enfermedades respiratorias, reducción de la función pulmonar, agravamiento del asma, y muertes prematuras por afecciones respiratorias y cardiovasculares.
- Plomo (Pb) y otros aditivos metálicos: Su empleo como antidetonante en la gasolina ha propiciado durante mucho tiempo emisiones que han demostrado tener impactos nocivos en el coeficiente intelectual de los niños. Sin embargo, desde 1998 las gasolinas que se comercializan en México no contienen plomo.
- Amoníaco (NH₃): Las emisiones de amoníaco cobran importancia ambiental por el hecho de que este contaminante suele reaccionar con SO_x y NO_x para formar partículas secundarias tales como el sulfato de amonio [(NH₄)₂SO₄] y el nitrato de amonio (NH₄NO₃), las cuales tienen un impacto significativo en la reducción de la visibilidad. La exposición a concentraciones altas de este contaminante puede provocar irritación de la piel, inflamación pulmonar e incluso edema pulmonar.
- Bióxido de carbono (CO₂): El bióxido de carbono no atenta contra la salud pero es un gas con importante efecto invernadero que atrapa el calor de la tierra y contribuye seriamente al calentamiento global.
- Metano (CH₄): El metano es también un gas de efecto invernadero generado durante los procesos de combustión en los vehículos. Tiene un potencial de calentamiento 21 veces mayor al del bióxido de carbono.
- Óxido nitroso (N₂O): Este contaminante, que pertenece a la familia de los óxidos de nitrógeno, también contribuye al efecto invernadero y su potencial de calentamiento es 310 veces mayor que el bióxido de carbono.

2.3. Importancia relativa de las emisiones de fuentes vehiculares

La contribución de las emisiones de los vehículos automotores en México a las emisiones totales a nivel nacional es considerable. De acuerdo con el primer Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999, los vehículos automotores contribuyeron con el 31% de las emisiones de óxidos de nitrógeno, 62% de monóxido de carbono y 22% de las emisiones totales de compuestos orgánicos volátiles. Al mismo tiempo son una fuente importante de emisión de partículas, sobre todo de las partículas más finas (Figura 2-2), (INESEMARNAT, 2006).

El Cuadro 2-2 muestra la contribución porcentual del sector transporte a las emisiones de origen antropogénico en diversas ciudades, con base en sus inventarios de emisiones o programas PROAIRE. En este cuadro se pueden observar dos cuestiones relevantes. Por un lado, se aprecia que los vehículos automotores contribuyen mayormente a las emisiones totales de contaminantes como CO, NOx y PM, y en menor magnitud a las emisiones de contaminantes como SO₂ y NH₃. Por otro lado, resalta también evidente el hecho de que en los diferentes inventarios locales, se consideran diversas formas de representar a los hidrocarburos.

Figura 2-2. Emisiones por tipo de fuente antropogénica a nivel nacional (INEM, 1999)



Cuadro 2-2. Contribución porcentual de las emisiones vehiculares a las emisiones antropogénicas en diferentes ciudades o zonas metropolitanas de México

Ciudad o zona	Contaminante										
	CO	NOx	NH ₃	SO ₂	COT	GOT	HC	COV	PM10	PM2.5	Partículas
ZMVM ¹	99	82	22	50	25	NE	NE	36	24	59	NE
ZMG ²	100	91	NE	30	NE	NE	57	NE	NE	NE	78
ZMM ³	100	64	NE	8	NE	NE	66	NE	NE	NE	11
ZMVP ⁴	96	81	NE	3	51	NE	NE	NE	5	NE	NE
ZMVT ⁵	100	90	NE	16	NE	NE	58	NE	NE	NE	65
Salamanca ⁶	87	38	NE	1	NE	NE	74	NE	11	NE	NE
Cd. Juárez ⁷	91	51	NE	2	55	NE	NE	NE	9	18.2	NE
Mexicali ⁸	91	81	NE	25	NE	NE	61	NE	1	NE	NE
Tijuana – Rosarito ⁹	94	82	NE	3	NE	48	NE	NE	4	NE	NE

NE: No Estimado

1. Inventario de emisiones 2004 de la Zona Metropolitana del Valle de México – ZMVM-, (SMA-GDF, 2004)
2. Programa para el mejoramiento de la calidad del aire de la Zona Metropolitana de Guadalajara –ZMG-, 1997-2001 (GEJ, et al., 1997)
3. Programa de administración de la calidad del aire del Área Metropolitana de Monterrey – ZMM-, 1997-2000, (GENL, et al., 1997)
4. Programa de gestión de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla –ZMVP-, 2006-2011, (SMRN-Puebla, 2006)
5. Aire limpio: programa para el valle de Toluca, 1997-2000, (GEM, et al., 1997)
6. Programa para mejorar la calidad del aire en Salamanca, 2003-2006, (GEG, et al., 2004)
7. Programa de gestión de la calidad del aire de Ciudad Juárez, 2006-2012, (HECH, et al., 2006)
8. Programa para mejorar la calidad del aire de Mexicali, 2000-2005, (GEBC, et al., 1999)
9. Programa para mejorar la calidad del aire Tijuana-Rosarito, 2000-2005, (GEBC et al., 2000)

Fuente: Elaboración propia INE.

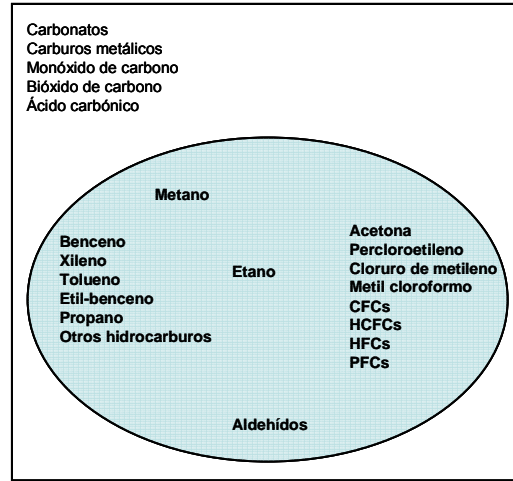
En conjunto, los gases considerados como hidrocarburos son conocidos como compuestos orgánicos totales (COT). Este concepto incluye a todos los compuestos carbonados excepto los carbonatos, carburos metálicos, monóxido de carbono y bióxido de carbono. Con frecuencia, en el contexto de la gestión de la calidad del aire, los COT también son referidos como gases orgánicos totales (GOT) o como hidrocarburos totales (HCT o HC). Desde una perspectiva de calidad del aire, es importante señalar que algunos de los COT emitidos a la atmósfera tienen una reactividad fotoquímica muy baja, o bien, carecen de ella. Por otra parte, los compuestos considerados fotoquímicamente reactivos son denominados compuestos orgánicos volátiles (COV) o gases orgánicos reactivos (GOR). Entonces, por definición, los COV o GOR son un subconjunto de los

hidrocarburos totales, y son gases fotoquímicamente reactivos que pueden participar en la formación del ozono. Algunos de los compuestos en esta categoría de contaminantes incluyen aldehídos tales como el formaldehído y acetaldehído, además de compuestos aromáticos como el benceno. En general, es recomendable que se desarrollen estimaciones de emisiones tanto para COT como para COV, de manera tal que el usuario tenga flexibilidad para elegir el grupo de contaminantes adecuado para el propósito del inventario de emisiones.

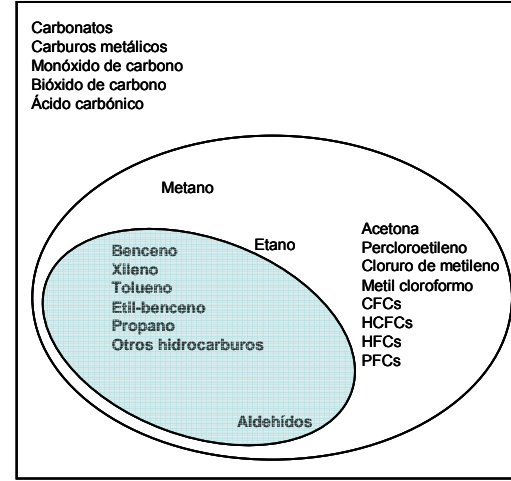
Otras definiciones de hidrocarburos que en ocasiones aparecen en la literatura de calidad del aire y de factores de emisión incluyen: gases orgánicos no metánicos (GONM), hidrocarburos no metánicos (HCNM), hidrocarburos totales (HCT) e hidrocarburos (HC). La consideración de diferentes subcategorías de hidrocarburos es importante en la definición de contaminantes a inventariar a fin de evitar confusiones. Por ello, en la Figura 2-3, se ilustra la relación entre las diversas definiciones de hidrocarburos. Las áreas sombreadas indican los compuestos incluidos en cada definición.

Finalmente, es importante mencionar que la gestión de la calidad del aire en relación con las fuentes móviles implica todo un reto en materia de coordinación de los diferentes ámbitos de gobierno, pues como se ha establecido en la “Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones”, la jurisdicción a la cuál pertenecen los diversos tipos de vehículos puede variar. Así, sabemos que hay vehículos que cuentan con una placa de circulación estatal y están sujetos a la legislación estatal y normatividad federal, o bien, como el caso de algunos transportes de carga y pasajeros, cuentan con placa de circulación federal y no quedan sujetos a los programas estatales. Por ello, se reitera que para lograr una buena gestión en esta materia es indispensable contar con un inventario de emisiones que permita identificar la contribución de diversas clases de fuentes móviles, y contar con una buena coordinación estatal y federal para implementar las medidas correspondientes.

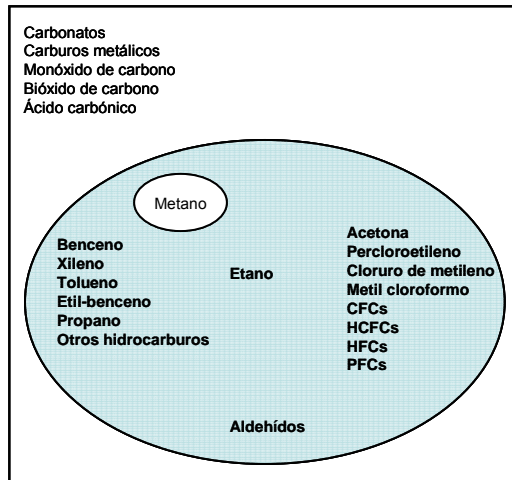
Figura 2-3. Descripción de los grupos de hidrocarburos



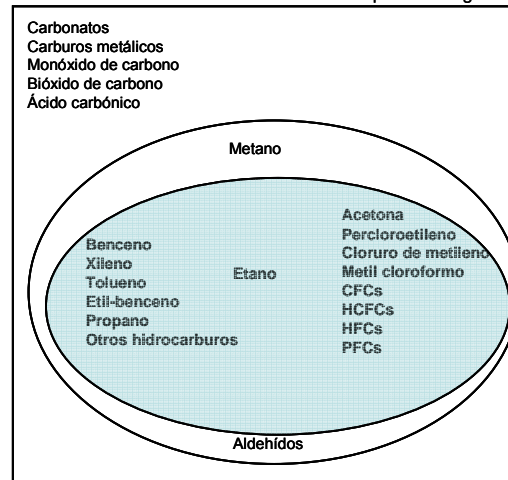
Compuestos Orgánicos Totales – COT
Gases Orgánicos Totales - GOT



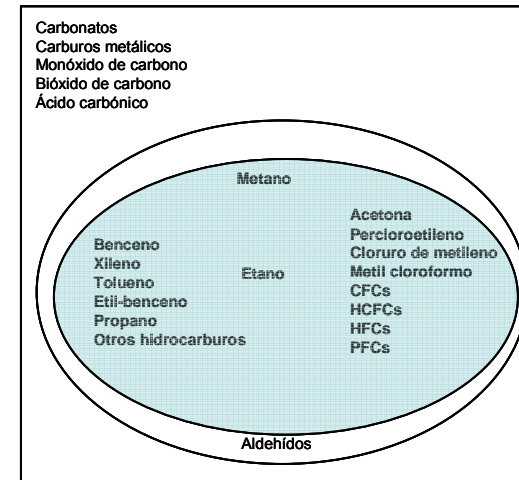
Compuestos Orgánicos Volátiles – COV
Gases Orgánicos Reactivos – GOR
Compuestos Orgánicos Reactivos - COR



Gases Orgánicos No Metano – GONM
Compuestos Orgánicos No Metano - CONM



Hidrocarburos No Metano - HCNM



Hidrocarburos Totales – HCT
Hidrocarburos - HC

Fuente: INE-SEMARNAT, 2005

3. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES VEHICULARES

Actualmente la estimación de emisiones de fuentes vehiculares presenta un reto en cuanto que, como ya se ha dicho, estas emisiones varían dependiendo de numerosos factores y, a diferencia de las fuentes puntuales, no es factible medir las emisiones provenientes de cada una de las fuentes móviles debido a la gran cantidad y variedad de vehículos en circulación que existen. Sin embargo, una adecuada estimación de este tipo de emisiones es indispensable si se pretende usar el inventario para la identificación de cambios debidos a la implementación de un programa o medida de control de calidad del aire. Esto se debe a que estos cambios generalmente no representan más de un cinco o diez por ciento del total del inventario, por lo tanto, si la estimación no es suficientemente precisa, no es útil para identificar el cambio.

Para generar un inventario de emisiones vehiculares confiable y preciso es indispensable conocer y entender la metodología general que se emplea en su elaboración. Existen diversos métodos para estimar emisiones vehiculares; sin embargo, existe una metodología general que permite estimar¹ el inventario de emisiones con base en algunos elementos indispensables. Las emisiones del tubo de escape de toda la flota de vehículos que circulan en un municipio, ciudad o región, pueden ser descritas en forma generalizada por medio de la siguiente expresión:

$$E = NU * DA * FE$$

Donde:

- E = Emisión total del contaminante de interés (CO, NOx, o HC, etc.)
- NU = Número total de vehículos de interés (automóvil, taxi, microbús, pick up, etc.)
- DA = Actividad vehicular, expresada como la distancia total recorrida por los vehículos de interés en un tiempo determinado y bajo condiciones de circulación conocidos (generalmente se expresa en kilómetros recorridos por día o año)
- FE = Factor de emisión para el contaminante de interés, para el tipo de vehículo en cuestión y para las condiciones de circulación de los vehículos expresado en unidades de masa (por ejemplo gramos de contaminante emitido) por distancia recorrida (por ejemplo kilómetros).

¹ Debido, precisamente, al hecho de que no se están evaluando directamente las emisiones de cada vehículo en circulación en la zona de estudio, es práctica común referirse al inventario resultante como una *estimación* del inventario de emisiones.

La fórmula indica que la cantidad total de emisiones de un contaminante determinado es una función de la cantidad de vehículos considerados en el análisis, así como de la distancia total recorrida por cada uno de éstos y de los factores de emisión asociados con cada tipo o categoría de vehículo. Esto es, los elementos clave en la estimación de un inventario de emisiones de fuentes vehiculares son:

- El número de vehículos de cada tipo o categoría,
- La distancia recorrida por unidad de tiempo (día o año) por cada tipo de vehículo,
- Las condiciones de circulación – entre las cuales destacan las velocidades de circulación, aceleraciones, pendientes del camino, uso del aire acondicionado etc.; y
- Los factores de emisión asociados a cada contaminante, condición de circulación y tipo de vehículo.

Existen varias formas de derivar estos insumos, cada uno con distintos beneficios y problemas de aplicación. A continuación se describen con mayor detalle las consideraciones generales que se deben atender cuando se recopila y procesa la información necesaria para poder aplicar de manera apropiada la metodología antes mencionada.

3.1. Número de unidades (NU)

El término “número de unidades” se refiere a la población vehicular activa o en circulación en la zona objeto de estudio. Sin embargo, es importante destacar que el número total de vehículos en circulación en la zona de estudio puede ser muy diferente al número de vehículos registrados con domicilio en ella. Esta situación puede ser mejor ilustrada con los siguientes ejemplos:

- En una zona comercial, industrial o de oficinas, por ejemplo, normalmente se pueden encontrar durante el día muchos vehículos domiciliados fuera de la misma. Así mismo, para una zona residencial se puede esperar que los vehículos ahí registrados recorran una gran cantidad de sus kilómetros anuales fuera de ella, incluso pueden operar por todo el país.

- Otro ejemplo de este efecto es el tráfico constante que se encuentra en carretera entre ciudad y ciudad. Estos vehículos emiten contaminantes cuando transitan por las carreteras aún cuando la mayoría de ellos son registrados con domicilio en alguna ciudad en particular.
- La legislación local y otros controles vehiculares pueden ampliar estas diferencias. La existencia de un programa estricto de verificación vehicular en algún municipio podrá incentivar a sus residentes a registrar sus vehículos en otro municipio. Así mismo, vehículos circulando en el municipio pero que están registrados con un domicilio distinto podrán tener mayores niveles de emisión que los vehículos que están registrados con domicilio en el municipio.

En general, en la determinación del número total de unidades a considerar en el desarrollo de un inventario de emisiones de fuentes móviles deben tomarse en cuenta todos estos aspectos y cualquier otro que pueda provocar un sesgo significativo en la delimitación de la flota vehicular.

3.1.1. Tipos de vehículos

Es evidente que la cantidad de emisiones por distancia recorrida de un tractocamión con motor a diesel es totalmente diferente a las de un auto compacto con motor a gasolina. Esto se debe, como se mencionó anteriormente, a que las emisiones varían de acuerdo con el tipo de vehículo, uso, tipo de combustible, tipo de tecnología, tamaño del motor y edad del vehículo, entre otros factores. Por ello, no basta con conocer el número total de vehículos que circulan en la región de interés, sino que es necesario caracterizar a la flota vehicular de tal forma que los vehículos puedan ser agregados en grupos o categorías con características de emisión similares, para posteriormente tratar de cuantificar las emisiones para cada grupo. Las variables o criterios de agregación de vehículos comúnmente usados al llevar a cabo una caracterización de la flota vehicular son:

- Tipo de vehículo (auto, microbús, autobús, camión, motocicleta, etc.)
- Combustible utilizado (gasolina, diesel, gas, etc.)
- Peso vehicular (agrupando vehículos de un mismo tipo en subclasificaciones similares como autos compactos, medianos, grandes, SUVs, etc.)
- Desplazamiento del motor (o cilindrada, en cm³ o litros)

- Uso vehicular (un taxi, por ejemplo, típicamente recorre más kilómetros por día que un auto particular y por lo tanto las emisiones de los taxis son proporcionalmente mayores)
- Nivel tecnológico (estándares de emisión Tier 0, Tier I, Tier II, EPA98, EURO III, EURO IV, etc.)
- Edad del vehículo (que afecta su nivel tecnológico, recorrido anual y calidad de mantenimiento, entre otros)

La clasificación por nivel tecnológico se refiere al tipo de control de emisiones en cada vehículo. Generalmente, las nuevas tecnologías van cambiando para adaptarse a la regulación vigente. En este contexto son relevantes los estándares de emisión Tier y EPA, establecidos en los Estados Unidos para vehículos a gasolina y diesel, respectivamente; así como los estándares EURO, para este mismo tipo de vehículos, que rigen en la Unión Europea. Su importancia para México radica en el hecho de que éstos han sido utilizados como referencia para el desarrollo de nuestra normatividad con respecto a los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes en vehículos nuevos; y aún cuando no se ha logrado homologar las normas oficiales mexicanas con los estándares americanos y europeos, la tendencia debe ser hacia lograrlo.

Los estándares de emisión evolucionan en el tiempo y se hacen cada vez más estrictos, lo que hace que la composición relativa de los tipos de vehículos que circulan en una ciudad también evolucione y se haga más compleja. De ahí la necesidad de considerar esta variable en la caracterización de la flota vehicular de una ciudad o región.

Las herramientas más detalladas para estimar un inventario de emisiones de fuentes vehiculares contienen otras subclasificaciones basadas en otros criterios además de los antes señalados. Por ejemplo, el modelo para estimar factores de emisión MOBILE6 utiliza 28 clases vehiculares sobre la base del peso bruto vehicular y tipo de combustible empleado por el vehículo. El Cuadro 3-1, muestra las categorías vehiculares usadas en el reporte del inventario de emisiones 2004 de la Zona Metropolitana del Valle de México (SMA-GDF, 2004) y su homologación con algunas de las categorías usadas en el modelo MOBILE6.

Cuadro 3-1. Homologación de categorías vehiculares del inventario de emisiones 2004 de la ZMVM con MOBILE6

Categoría vehicular ZMVM 2004	Correspondencia con las categorías de Mobile6	
	Vehículos a gasolina	Vehículos a diesel
Auto Particular	LDGV	LDDV
Taxi	LDGV	-----
Combi	LDGT1	-----
Microbús	HDGV3	HDDV3
Pick up	LDGT1 LDGT2	LDDT12
Vehículos < 3 toneladas	LDGT3	LDDT34
Tractocamiones	-----	HDDV8b
Autobús	-----	HDDBT
Vehículos ≥ 3 toneladas	HDGV2b	HDDV2b
	HDGV3	HDDV3
	HDGV6	HDDV6
	HDGV7	HDDV7
	HDGV8a	HDDV8a
Motocicletas	MC	-----

Por lo anterior, es evidente que para estimar un inventario de emisiones de fuentes móviles se necesita conocer el número total de vehículos de cada categoría que circulan en el área de interés; y mientras mejor se conoce la caracterización de la flota vehicular, mejor será la estimación del inventario de emisiones.

3.1.2. Fuentes de información

Conforme a los resultados obtenidos en el estudio denominado “Estudio sobre información y herramientas para la estimación de emisiones de fuentes móviles en México”, desarrollado por el INE durante el 2006 (INE-CTS, 2006b), la información necesaria para determinar el tamaño y la caracterización de la flota vehicular en ciudades de México puede ser obtenida de diferentes fuentes, tales como:

a) Bases de datos para el pago del impuesto sobre tenencia vehicular de las secretarías estatales de finanzas.

Las bases de datos sobre el pago del impuesto de tenencia vehicular normalmente contienen información sobre la residencia del propietario, uso del vehículo y año modelo, así como sobre la marca y submarca del vehículo. Por ello, en los casos en que estas bases de datos cuentan con toda esta información, son una referencia adecuada para apoyar la caracterización de la flota vehicular en una ciudad.

Algunas de las principales desventajas de las bases de datos sobre tenencia vehicular disponibles en las secretarías estatales de finanzas son que normalmente no cuentan con el detalle técnico necesario como para asignar de manera directa a cada vehículo una subcategorías vehicular y así asignarle el factor de emisión apropiado. Esto requiere de un trabajo adicional. Más aún, en algunos casos los campos de los datos necesarios para la caracterización vehicular, como por ejemplo submarca, son de captura libre y generalmente no son confiables. Así mismo, algunas de estas bases de datos no se encuentran capturadas en archivos electrónicos, lo que dificulta su uso. Finalmente, otra implicación importante relacionada con el uso de esta información consiste en que se podría sobreestimar el tamaño real de la flota en circulación debido a que es posible que las bases de datos de las secretarías de finanzas de los estados no registren las bajas de los vehículos que ya no circulan.

b) Bases de datos del programa de verificación vehicular

Las bases de datos de los diferentes programas de verificación vehicular existentes en el país suelen incluir información sobre: marca, submarca, año modelo, peso vehicular y tipo de tecnología, lo que las convierte en una buena fuente de información para llevar a cabo la caracterización de la flota vehicular en las ciudades donde dichos programas operan, particularmente cuando éstos son de carácter obligatorio y además son eficientes en su aplicación.

En el caso específico del Distrito Federal, por ejemplo, los datos derivados del Programa de Verificación Vehicular (PVV) de la ZMVM han sido muy útiles en la caracterización de la flota vehicular ya que, por un lado, este programa cuenta con la información detallada de los vehículos y, por otro, el programa es realmente obligatorio, lo que implica que los vehículos que están registrados en la base de datos de la Secretaría de Finanzas del DF deben cumplir con este programa y estar registrados también en las bases de datos del PVV. Además, la eficiencia de este programa es alta debido a que los ciudadanos han llegado a entender las metas y objetivos del mismo y a que, adicionalmente, las multas por incumplimiento son elevadas.

c) Estudios desarrollados por las autoridades de transporte

En algunos estados existen estudios sobre flota vehicular realizados por las autoridades estatales de transporte; sin embargo, este tipo de estudios no deben considerarse como fuente principal de información para caracterizar la flota vehicular,

ya que sus datos no fueron generados con fines de elaboración de inventarios y pueden diferir de otros datos generados para la misma ciudad. Esta información puede ser utilizada para complementar la información de las bases de datos de finanzas y, en su momento, para validarla.

d) Bases de datos de aforos vehiculares

Para la obtención de información referente a los volúmenes de tránsito existen los métodos de aforo vehicular. Un aforo vehicular es un conteo de los vehículos que pasan por un punto determinado y a partir de él se puede obtener información sobre los volúmenes vehiculares que transitan en un punto de interés por periodo de tiempo, su velocidad y hasta el tipo de vehículo. Por ello, mediante el uso de aforos vehiculares también es posible llegar a caracterizar la flota vehicular. Sin embargo, la caracterización que se obtiene con estos datos es parcial y es necesario llevar a cabo un trabajo adicional de encuesta o evaluación de la venta de vehículos nuevos para complementar la caracterización por tipo de combustible y año modelo, por ejemplo.

Es importante mencionar que la utilidad y confiabilidad de los datos generados por los aforos vehiculares, en términos de la caracterización de la flota vehicular de una ciudad con fines de generación de un inventario de emisiones, será mayor en la medida en que:

- La cantidad y tipo de vialidades aforadas sea representativa de la red vial de la región de estudio (vialidades primarias, secundarias, etc.). Así mismo, es importante que se considere el tipo de zona en la que se localizan las vialidades, ya que esto influye en el tipo y cantidad de vehículos que circulan en ella (por ejemplo, zona habitacional, zona comercial, etc., de distintos niveles socioeconómicos)
- Los aforos vehiculares sean realizados en épocas del año y horarios que representen la actividad vehicular típica de la zona de estudio. Se deben seleccionar días representativos de actividades cotidianas en la región, es decir: días laborables, con actividad escolar, evitando manifestaciones y accidentes viales, entre otros.

e) Datos obtenidos mediante encuestas

Se pueden conocer también datos de caracterización vehicular a través del uso de encuestas a los conductores. Estas encuestas generalmente se realizan en sitios concurridos donde el conductor puede tomarse el tiempo de contestar la encuesta y el encuestador tiene oportunidad de tomar datos más detallados del vehículo (marca, submarca, etc.), por ejemplo centros comerciales o gasolineras. Para la realización de este tipo de encuestas, es importante tomar en cuenta:

- Tamaño de la muestra. Debe de ser representativo, es decir, al realizar la encuesta se debe considerar el tamaño de la población y de la flota vehicular, de manera que la muestra sea estadísticamente representativa.
- Diseño de la encuesta. Las encuestas deben estar enfocadas a obtener los datos requeridos a sabiendas que muchos conductores no conocen los datos técnicos de sus vehículos.
- Selección de puntos de encuesta. Derivado de un análisis económico de la zona, se deben seleccionar puntos en los cuales confluyan vehículos con diferentes características, de lo contrario se dejarían fuera algunas clases de vehículos. Por ejemplo, si se eligen únicamente estacionamientos de centros comerciales, la muestra será sesgada ya que en su mayoría se encontrarán vehículos de modelos recientes y de uso particular y no tantos vehículos de modelos anteriores o de transporte público o carga.

Finalmente, conviene destacar que algunas fuentes adicionales de información a las ya mencionadas, incluyen: a) anuarios de transporte y vialidad, b) estadísticas vehiculares disponibles en el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y c) padrones vehiculares locales, entre otros.

3.2. Datos de actividad (DA)

El término “dato de actividad” se refiere a los kilómetros recorridos por un vehículo (KRV), en un tiempo y espacio determinados, donde además las condiciones de circulación son conocidas (velocidades de circulación, aceleraciones, pendientes del camino, uso del aire acondicionado, etc.) Bajo este concepto general, para estimar un inventario de emisiones para una región, se necesita determinar los kilómetros totales recorridos en la región por todos los vehículos de cada subclasificación en el período de interés.

Como una primera aproximación, se podrá determinar el recorrido anual promedio por vehículo de cada tipo o clase y multiplicarlo por el número total de vehículos de ese tipo. Por ejemplo, si el recorrido promedio de 10,000 automóviles particulares es de 10,000 kilómetros por año, su KRV será de 100 millones de kilómetros por año. Sin embargo, esta primera aproximación tendrá asociada una gran incertidumbre dado que las emisiones de los vehículos no sólo dependen del número de unidades y del kilometraje que recorre cada uno de ellos, sino que existen factores tales como la velocidad a la que se recorren esos kilómetros y el número de viajes realizados por vehículo, que también inciden en las emisiones generadas por un automóvil.

Para llevar a cabo la estimación de un inventario de emisiones vehiculares de una forma confiable y precisa, resulta indispensable estimar la actividad vehicular considerando estos factores, como se explica en las siguientes secciones.

3.2.1. Distribución por velocidad

Las emisiones por el escape de un vehículo varían sensiblemente con la velocidad y las tasas de aceleración a las cuales éste se sujeta. Por ejemplo, en condiciones de tráfico muy congestionado, donde el vehículo pasa mucho tiempo parado y experimenta arranques y paros continuos, se gasta más combustible y se emite una mayor cantidad de contaminantes por kilómetro recorrido, en comparación con lo que sucede a velocidades medias donde el flujo del tráfico es más libre y continuo. A altas velocidades aumenta la resistencia del aire al paso del vehículo lo que nuevamente conduce a que se gaste más combustible y se emitan más contaminantes por kilómetro recorrido que a velocidades medias (Figura 3-1). Por ello, para estimar un inventario de emisiones de fuentes vehiculares de manera precisa, resulta importante determinar el dato de actividad (KRV) tomando en consideración las diferentes velocidades experimentadas en la zona geográfica que cubre el inventario.

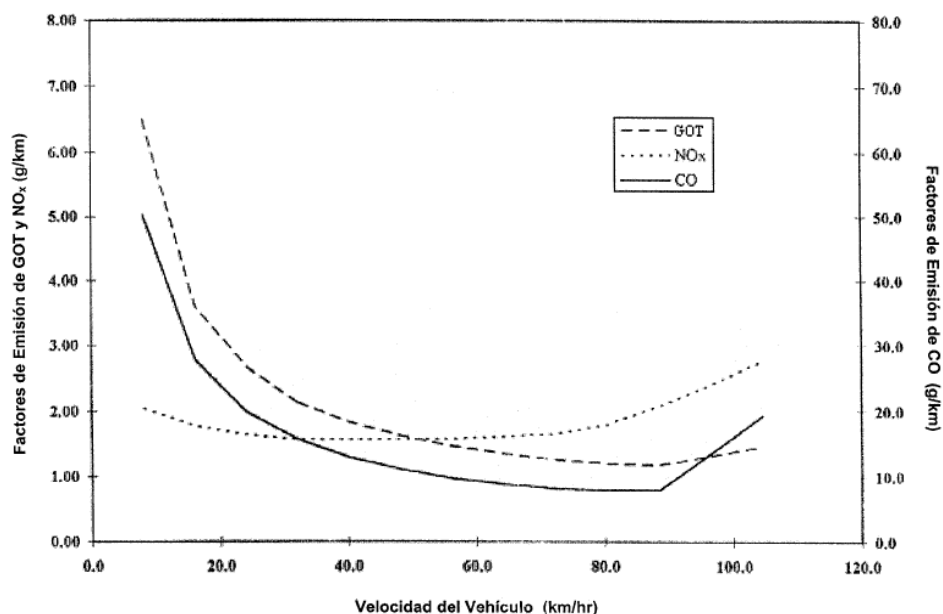
La estimación de las velocidades vehiculares promedio en un municipio, ciudad o región no es una tarea sencilla, debido a que son muchos los factores que inciden en las velocidades que pueden desarrollar los vehículos. Sin embargo, una práctica común para obtener el dato de actividad desagregado en diferentes velocidades consiste en medir el flujo vehicular en cada clase de vía en la zona de interés y multiplicar el resultado (vehículos/día) por la longitud de la vía (Km.). Este método se basa en el hecho de que, por sus características, en cada tipo de vía las velocidades alcanzadas son diferentes. Por ejemplo, en las autopistas y vías rápidas las

velocidades promedio alcanzadas tienden a ser superiores a las que se alcanzan en los bulevares y arterias, que a su vez tienen velocidades promedio mayores que las alcanzadas en los caminos locales.

En México, estudios recientes orientados a caracterizar la flota vehicular de la Zona Metropolitana del Valle de México por tipo de vía (Davis, et al., 2004), han considerado los siguientes tipos de vialidad:

- Vía rápida – normalmente cuenta con camellón y no permite el acceso de vehículos pesados,
- Vía arterial – camino principal frecuentemente con semáforos y cruces; y
- Vía residencial o rural.

Figura 3-1. Factores de emisión promedio del parque vehicular para GOT, NO_x y CO a diferentes velocidades



En Estados Unidos, frecuentemente se considera, además de las vías anteriores, a las rampas de aceleración entrando a las autopistas, las cuales suelen presentar mayores tasas de emisión por kilómetro que cualquier otro tipo de camino.

Otra consideración importante al determinar la actividad vehicular por velocidad, es su distribución horaria, pues aún en un mismo tipo de vialidad, la velocidad a la que son conducidos los vehículos es diferente de acuerdo el flujo vehicular y éste último varía de acuerdo con la hora del día. Por ejemplo, en las áreas urbanas, las variaciones del

congestionamiento del tráfico afectan de manera significativa las velocidades promedio de circulación. Es necesario, por tanto, calcular la actividad vehicular para cada hora del día.

3.2.2. Número de viajes por día

Si bien es cierto que las emisiones más significativas de un vehículo, en términos de la masa total emitida, son aquellas que provienen de su escape cuando el vehículo está en operación normal con el motor caliente, también es cierto que se registran otros tipos de emisión, como las emisiones adicionales por el escape cuando el motor está frío (y su convertidor catalítico tiene baja eficiencia). Ambas deben ser consideradas cuando se elabora un inventario de emisiones vehiculares, y la forma en que éstas son evaluadas es a través del número de viajes por vehículo y por día, así como el tiempo entre viaje y viaje que determina la cantidad de arranques en frío y en caliente.

El número de viajes por vehículo por día normalmente es determinado a través de modelos de demanda o de mediciones directas en campo. Tradicionalmente, un viaje se define como un recorrido de un origen a un destino. Sin embargo, ya que las emisiones de un vehículo se elevan durante su arranque, el inventario de emisiones debe tomar en cuenta cada arranque, sea caliente o en frío. Los viajes cortos, por ejemplo para cambiar de lugar en un estacionamiento, frecuentemente son olvidados en las encuestas de actividad vehicular, aunque sería importante considerarlos.

Por otra parte es importante determinar los periodos de inactividad entre viajes pues se emiten hidrocarburos evaporativos tanto cuando el vehículo está siendo conducido como cuando está parado. El tiempo de inactividad antes de cada arranque afecta la magnitud de las emisiones en el arranque. Por estas razones, el inventario de emisiones debe tomar en cuenta el perfil de “tiempo de reposo” del vehículo (concepto que también es conocido como “*soak time*” en inglés).

3.2.3. Uso del aire acondicionado

El uso del aire acondicionado en un vehículo consume potencia del motor, aumentando su consumo de combustible y sus emisiones por el escape. A baja velocidad, en tráfico congestionado, el impacto (en g/Km.) es mayor que a alta velocidad. Por ello, es importante que cuando se lleven a cabo estudios de campo

para caracterizar la actividad vehicular se tenga en consideración este factor. Los factores que influyen en el uso del aire acondicionado son, entre otros:

- Características del clima en la zona (temperatura y humedad);
- El nivel socioeconómico de la población, ya que los vehículos con aire acondicionado son típicamente más caros; y
- El nivel de seguridad personal en la zona, ya que afecta la disposición de los conductores con respecto a mantener una ventana abierta.

3.2.4. Fuentes de información

La caracterización apropiada tanto de los patrones de conducción como de arranque requiere de la realización de estudios de campo específicos en la zona de interés. Sin embargo, si no se cuenta con toda la información necesaria sobre actividad vehicular y condiciones de operación para una ciudad en particular, en una primera estimación del inventario de emisiones vehiculares puede ser suficiente con disponer de información relativa a la cantidad de kilómetros recorridos por cada categoría vehicular. Para lograr una adecuada caracterización de la actividad vehicular, el “Estudio sobre información y herramientas para la estimación de emisiones de fuentes móviles en México”, desarrollado por el INE (INE-CTS, 2006b), identificó las siguientes fuentes de información:

a) *Bases de datos del programa de verificación vehicular (PVV)*

Las bases de datos de algunos de los programas de verificación vehicular existentes en el país además de incluir información sobre marca, submarca, año modelo, peso vehicular y tipo de tecnología, pueden incluir las lecturas del odómetro, por lo que se les puede considerar una posible fuente de información sobre actividad vehicular. Sin embargo, para dar certeza al uso de los datos generados a través de los programas de verificación vehicular, es necesario que dichos programas sean tanto detallados como obligatorios y eficientes.

Otras consideraciones importantes al hacer uso de los datos del odómetro son que, por un lado, los odómetros pueden haber sufrido daños o alteraciones, accidentales o intencionales, y por tanto sus lecturas resultan erróneas. Por otro lado, se debe considerar que no hay certeza de que los kilómetros registrados por el odómetro, estando éste en buen estado, hayan sido necesariamente recorridos dentro de la región de estudio.

b) Estudios desarrollados por las autoridades de transporte

En algunos estados existen estudios realizados por las autoridades de transporte en los que se ha recopilado información sobre kilómetros recorridos por tipo de vehículo en la ciudad, así como sobre las características de la red vial. Sin embargo, estos estudios no son actualizados con la frecuencia deseada, es decir, con la misma frecuencia que se desarrollan los inventarios de emisiones (cada dos años en el caso del Distrito Federal, por ejemplo), por lo que cuando esta información existe es necesario extrapolar los datos reportados a años posteriores.

Otro inconveniente en el uso de esta información es que, con frecuencia, dichos estudios no están documentados apropiadamente y por ello no cuentan con un registro detallado de la metodología empleada para la realización de los recorridos o aforos y la determinación de KRV, lo que limita su uso en la generación de un inventario de emisiones de fuentes vehiculares.

c) Bases de datos de aforos vehiculares

La Agencia de Protección Ambiental de Los Estados Unidos, recomienda que los datos de actividad vehicular (KRV) correspondientes a la zona del estudio se determinen con base en aforos vehiculares en las diferentes vías de la ciudad o a través de un modelo de transporte.

Mediante el uso de aforos vehiculares es posible conocer de manera efectiva los kilómetros recorridos por las diferentes categorías vehiculares en la zona de interés. Lo anterior se obtiene a partir de los datos del aforo propiamente (contabilización del flujo de vehículos por hora) y de la longitud de la vialidad (ya sea mediante cartografía o mediante recorridos). El número de vehículos de cada categoría que han circulado en la vialidad se multiplica entonces por la longitud de la misma y de esta forma se obtiene un estimado de la actividad vehicular en el sitio de interés. Para que los datos de actividad obtenidos mediante aforos vehiculares sean confiables se recomienda que tomen en cuenta la representatividad de las vialidades que se aforan (en términos de longitud, número de carriles, tipo de vehículos que circulan en ellas, etc.), así como de los periodos de tiempo en los que se realizan dichos aforos. Evidentemente, mientras más extenso sea el aforo, más certidumbre tendrán los resultados del inventario.

Por lo que respecta a los modelos de transporte, es importante destacar que aunque en el mercado existen varios modelos y con diferente nivel tanto de complejidad de uso como de demanda de insumos, en México existe poca experiencia en su aplicación. Sin embargo, no deben descartarse como una herramienta valiosa en la determinación de la actividad vehicular en una ciudad o municipio, a pesar de que ningún modelo podrá generar datos útiles si no está adecuadamente calibrado con datos provenientes de múltiples aforos vehiculares en la ciudad bajo estudio.

d) Datos sobre consumo de combustible

El empleo de datos sobre consumo de combustible puede ayudar a estimar de manera indirecta el dato de actividad vehicular en una ciudad o municipio. Existen, sin embargo, varios factores que elevan la incertidumbre en estos resultados. Por un lado, no se tiene control sobre aquellos vehículos que han cargado combustible fuera de la zona de estudio y posteriormente circulan en ésta y, por otro lado, no puede asumirse que aquellos vehículos que cargan combustible en la región de estudio únicamente circularán en esta zona. Este puede ser el caso de los vehículos de transporte de carga que utilizan diesel, o incluso de vehículos particulares a gasolina.

Por lo anterior, el uso de estos datos es recomendable sólo como un medio para validar los datos de actividad vehicular obtenidos a partir de otras fuentes de información, siempre y cuando se disponga de datos de consumo de combustible por marca y submarca. Normalmente, el uso de estos datos es más confiable en áreas de estudio grandes que en áreas de estudio pequeñas; para el país completo pueden ser una fuente válida de información pero no proporciona el grado de detalle que se requiere para un municipio o ciudad en particular.

e) Uso de datos de inventarios de emisiones anteriores

En el proceso de elaboración de actualizaciones de inventarios de emisiones de fuentes vehiculares es práctica común utilizar como punto de partida los datos del inventario inmediato anterior. Esto puede resultar positivo ya que le da cierta consistencia a la estimación; sin embargo, existe el riesgo de que si se cometió algún error en la primera estimación, este error sea acarreado en cada actualización del inventario.

3.3. Factores de emisión (FE)

Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad. En el caso de los vehículos automotores, los factores de emisión se expresan en unidades de masa de contaminante emitido por distancia recorrida. En México estos factores tienen unidades de gramos por kilómetro recorrido (g/Km.).

Como se ha mencionado en las secciones anteriores de este capítulo, las emisiones contaminantes de un vehículo son influenciadas por su edad, la tecnología del motor, la velocidad de circulación, las características del combustible, las condiciones de operación, las condiciones meteorológicas y muchos otros elementos. Esto es, las emisiones vehiculares son complejas y dinámicas, lo que dificulta la determinación de sus factores de emisión. Sin embargo, a través de los años se han desarrollado diferentes técnicas para la determinación los factores de emisiones de fuentes móviles, las cuales se pueden clasificar en: 1) técnicas directas, y 2) técnicas indirectas. En las siguientes secciones se describen, de manera genérica, cada una de ellas.

4.3.1. Técnicas directas para obtener factores de emisión

Las técnicas directas para la obtención de factores de emisión vehiculares están basadas en mediciones directamente en la fuente. Algunos ejemplos de estas técnicas son el uso de monitoreo a bordo (método en el que a partir de un sistema de medición autotransportado se miden las emisiones bajo condiciones de operación reales de los vehículos) y las pruebas dinamométricas (realizadas sobre dinamómetros de chasis donde se aplican diferentes cargas y velocidades a los vehículos automotores en función del patrón o ciclo de manejo utilizado). Aún cuando la medición en sí puede ser precisa, cualquier diferencia entre el ciclo de prueba utilizado y el uso o condiciones reales de operación de los vehículos (en cada clase de vía y hora del día), puede implicar diferencias considerables en las emisiones. Estas pruebas, generalmente, tienen un alto costo de implementación; sin embargo, si se hace una selección apropiada de los vehículos y se cuenta con una cantidad suficiente de ellos para la prueba, se tendrá una muestra representativa con información estadísticamente significativa para determinar los factores de emisión correspondientes a una flota general.

Existen otras técnicas directas, como las mediciones con equipo de detección remota, que permiten realizar miles de mediciones por día bajo una sola condición de manejo (como a la entrada a una autopista). El costo por medición en este caso es bajo, pero depende de una inversión de capital considerable. Los resultados permiten generar factores de emisión, aunque por las condiciones de operación de los vehículos evaluados, no son necesariamente representativos de todos los vehículos en circulación. A pesar de ello, los datos obtenidos a través de programas de monitoreo con equipo de detección remota son extremadamente útiles cuando incluyen lectores automáticos de las placas de los vehículos y, a través de éstas, es posible acceder a bases de datos (como las de la Secretaría de Finanzas de los estados, y de los programas de verificación vehicular, en las entidades que cuentan con ellos) y obtener información específica sobre cada vehículo:

- Tipo de vehículo y uso
- Marca y submarca
- Año modelo
- Número de cilindros
- Cilindrada
- Tipo de combustible
- Estado y municipio del registro vehicular

Debido a las limitaciones de costo y tiempo que implican las mediciones directas, es muy difícil determinar los factores de emisión para cada clase y tipo de vehículo en circulación a través de las técnicas antes mencionadas. Por ello, generalmente es más recomendable invertir los recursos que se tengan disponibles en la caracterización de la actividad vehicular (en una muestra de vehículos tan grande como sea posible), y utilizar técnicas o métodos indirectos para la determinación de los factores de emisión. En estos casos, las técnicas directas resultan de gran utilidad como método de calibración de las técnicas indirectas, generando factores de corrección con base en las condiciones locales, específicas de la zona, y a través de la medición de un número limitado de vehículos.

4.3.2. Técnicas indirectas para obtener factores de emisión

Las técnicas indirectas no involucran mediciones en cada fuente en el lugar o zona de estudio, sino que utilizan los resultados de miles de mediciones directas realizadas en otros lugares y las correlacionan con la flota específica que se estudia y los

parámetros locales que afectan sus emisiones. Aun cuando aparentemente las técnicas indirectas son menos precisas que las directas, frecuentemente lo que sucede es que, al estar basadas en un mayor número de mediciones, las técnicas indirectas proporcionan una mayor validez estadística al resultado.

Debido a la complejidad del manejo de las múltiples variables que afectan a la flota y sus emisiones, existen modelos computacionales diseñados expresamente para estimar los factores de emisión de las fuentes vehiculares. Básicamente, a través del análisis de bases datos provenientes de mediciones directas realizadas en otros lugares, estos modelos determinan el factor de emisión (en g/Km..) para cada contaminante de acuerdo a cada combinación de:

- Tipo de vehículo
- Tipo de combustible
- Nivel tecnológico y edad del vehículo
- Nivel de actividad distribuido por velocidad
- Perfil de número de viajes y arranques
- Otros factores, como temperatura ambiental y altitud

Uno de los modelos para determinar factores de emisión más utilizados alrededor del mundo es el MOBILE, el cual fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y será abordado con mayor detalle en el capítulo siguiente.

3.4. Otros factores a considerar

En esta sección se agrupan los elementos o variables externas al vehículo que se deben considerar en la determinación del inventario de emisiones vehiculares en circulación, los cuales están relacionados con las características de la localidad y el periodo seleccionado para desarrollar el inventario. A continuación se presentan estos datos en forma de listados; sin embargo, en la sección 5.1.2. se ha proporcionado mayor detalle sobre cómo influye cada uno de estos factores en las emisiones vehiculares.

3.4.1. Datos de la localidad

Existen una serie de datos requeridos para estimar el inventario de emisiones que dependen de la localidad, tales como:

- Temperatura ambiental
- Características del combustible (contenido de azufre y presión del vapor de Reid)
- Altitud (alta o baja)
- Humedad relativa
- Efectividad del programa de verificación vehicular
- Efectividad de controles para evitar modificaciones no-apropiadas al sistema de control de emisiones de los vehículos
- Efectividad de los sistemas de control de emisiones evaporativas en estaciones de servicio, etc.

3.4.2. Datos del inventario

Adicionalmente, existen una serie de factores que dependen del año y mes base para la elaboración del inventario de emisiones y modifican los resultados del mismo, como:

- Año calendario analizado
- Mes analizado (de invierno o verano)
- Día de semana analizado (laborable o de fin de semana)

4. MODELOS EMPLEADOS EN LA ELABORACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES VEHICULARES

Para facilitar la integración de los inventarios de emisiones vehiculares, se utilizan modelos computacionales, éstos toman como datos de insumo las características de la flota vehicular, el nivel de actividad y otros factores locales, ya sea para determinar los factores de emisión o directamente la emisión de cada contaminante correspondiente a las condiciones de actividad y flota. La mayoría de los modelos pueden generar directamente el valor total del inventario de emisiones; sin embargo, existen también modelos que generan como salida factores de emisión. Estos resultados pueden estar en función de un valor promedio ponderado del factor de emisión para toda la flota vehicular o una serie de factores de emisión desagregados por año modelo y tipo de vehículo. En ambos casos, el desarrollador del inventario debe multiplicar los factores calculados por el número de unidades y su actividad vehicular para obtener el valor estimado total del inventario.

En el presente capítulo se describen algunas generalidades de los modelos más ampliamente utilizados en el mundo, tales como: MOBILE, MOVES, IVE y COPERT.

4.1. Modelo MOBILE

El modelo MOBILE es un programa de cómputo integrado por rutinas elaboradas en lenguaje de programación Fortran y es utilizado para el cálculo de factores de emisión para vehículos automotores de gasolina y diesel, así como para ciertos vehículos especializados, tal como los vehículos a gas natural. El programa ha ido evolucionado y su versión actual (MOBILE6.2) proporciona una herramienta analítica flexible que puede aplicarse a una variedad amplia de condiciones geográficas y de características de la flota vehicular. En este sentido, es importante mencionar que existe una versión denominada MOBILE6-MEXICO que fue adaptada y modificada a las características tecnológicas de la flota vehicular del país.

Algunas de las aplicaciones primarias del modelo MOBILE6 han estado vinculadas al desarrollo de los inventarios estatales de emisión de fuentes móviles en Estados Unidos y en varios países del mundo donde predominan los vehículos con tecnología norteamericana, como es el caso de México.

Los factores de emisión calculados por MOBILE6 están dados para cada contaminante en gramos por milla (g/milla) y para cada tipo de vehículo considerado en la flota en cuestión. La estimación del inventario total se obtiene multiplicando esa cifra por una estimación de las millas totales recorridas (VMT) por todos los vehículos, de cada tipo o categoría, en la zona durante el periodo de tiempo cubierto por el inventario.

4.1.1. Categorías vehiculares

MOBILE6 calcula factores de emisión para 28 diferentes categorías vehiculares, las cuales son conformadas con base en criterios tales como uso del vehículo, tipo de combustible empleado, peso bruto vehicular y tecnología del motor (Cuadro 4-1). Adicionalmente, para cada categoría vehicular MOBILE6 es capaz de estimar factores de emisión para 25 años-modelo, dentro de los años calendario 1952 a 2050. Esto es, por ejemplo, si el año base del inventario de emisiones es 2009, para cada categoría vehicular se puede estimar el factor de emisión para los autos 2009 y los 24 años-modelo anteriores (EPA, 2003).

Es importante destacar que MOBILE6 no incluye, dentro de sus categorías vehiculares, vehículos fabricados de acuerdo con normas de otros países como Japón o la Comunidad Europea, sino sólo vehículos construidos bajo estándares estadounidenses (Tier0, TierI, TierII, EPA98, EPA2007, etc.).

La familia de modelos MOBILE fueron diseñados para estimar factores de emisión que consideran tanto las emisiones provenientes del escape como las emisiones evaporativas exclusivamente para los vehículos que circulan en vías y carreteras. Los factores de emisión para vehículos que operan fuera de camino, también llamadas fuentes móviles no carreteras (por ejemplo, aeronaves, locomotoras, equipo agrícola, equipo de construcción), normalmente son estimados con modelos como NONROAD.

Cuadro 4-1. Categoría vehiculares en MOBILE6

Tipo de vehículo	Descripción
LDGV	Vehículos ligeros a gasolina (vehículos de pasajeros)
LDGT1	Camiones ligeros a gasolina 1 (PBV* de 0 a 2,722 Kg.; PP** de 0 a 1,701 Kg.)
LDGT2	Camiones ligeros a gasolina 2 (PBV de 0 a 2,722 Kg.; PP > 1,701 a 2,608 Kg.)
LDGT3	Camiones ligeros a gasolina 3 (PBV > 2,722 a 3,856 Kg.; PPA*** de 0 a 2,608 Kg.)
LDGT4	Camiones ligeros a gasolina 4 (PBV > 2,722 a 3,856 Kg.; PPA de 2,609 Kg. y mayores)
HDGV2b	Vehículos pesados a gasolina clase 2b (PBV > 3,856 a 4,536 Kg.)
HDGV3	Vehículos pesados a gasolina clase 3 (PBV > 4,536 a 6,350 Kg.)

HDGV4	Vehículos pesados a gasolina clase 4 (PBV > 6,350 a 7,258 Kg.)
HDGV5	Vehículos pesados a gasolina clase 5 (PBV > 7,258 a 8,845 Kg.)
HDGV6	Vehículos pesados a gasolina clase 6 (PBV > 8,845 a 11,794 Kg.)
HDGV7	Vehículos pesados a gasolina clase 7 (PBV > 11,794 a 14,969 Kg.)
HDV8a	Vehículos pesados a gasolina clase 8a (PBV > 14,969 a 27,216 Kg.)
HDV8B	Vehículos pesados a gasolina clase 8b (PBV > 27,216 Kg.)
LDDV	Vehículos ligeros diesel (autos de pasajeros)
LDDT12	Camiones ligeros a diesel 1 y 2 (PBV de 0 a 2,722 Kg.)
HDDV2b	Vehículos pesados a diesel clase 2b (PBV de 3,856 a 4,536 Kg.)
HDDV3	Vehículos pesados a diesel clase 3 (PBV > 4,536 a 6,350 Kg.)
HDDV4	Vehículos pesados a diesel clase 4 (PBV > 6,350 a 7,258 Kg.)
HDDV5	Vehículos pesados a diesel clase 5 (PBV > 7,258 a 8,845 Kg.)
HDDV6	Vehículos pesados a diesel clase 6 (PBV > 8,845 a 11,794 Kg.)
HDDV7	Vehículos pesados a diesel clase 7 (PBV > 11,794 a 14,969 Kg.)
HDDV8a	Vehículos pesados a diesel clase 8a (PBV > 14,969 a 27,216 Kg.)
HDDV8b	Vehículos pesados a diesel clase 8b (PBV > 27,216 Kg.)
MC	Motocicletas (a gasolina)
HDGB	Autobuses a gasolina (escolar y transporte urbano e interurbano)
HDDBT	Autobuses de transporte urbano e interurbano a diesel
HDDBs	Autobuses escolares a diesel
LDDT34	Camiones ligeros a diesel 3 y 4 (PBV > 2,722 a 3856 Kg.)

*PBV – Peso Bruto Vehicular; ** PP – Peso de prueba; PPA – Peso de prueba alternativo

4.1.2. Contaminantes

MOBILE6 estima los factores de emisión para hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos del nitrógeno, bióxido de carbono, material particulado (proveniente de varios componentes como el desgaste de llantas y frenos, además de lo emitido por el escape del motor) y tóxicos como el benceno, metil terbutil éter, butadieno, formaldehído, acetaldehído y acroleína.

La versión más reciente, MOBILE6.2, es la primera versión que tiene capacidad para estimar las emisiones de material particulado y de tóxicos de fuentes vehiculares. MOBILE6.2 contiene modificaciones de menor importancia, comparado contra MOBILE6, para las partes del modelo que estiman emisiones de hidrocarburos, óxidos del nitrógeno y monóxido de carbono. Los contaminantes para los cuales MOBILE6 es capaz de generar factores de emisión en unidades de gramos de contaminante emitido por milla recorrida se muestran en el Cuadro 4-2.

Cuadro 4-2. Contaminantes considerados en el modelo MOBILE6

Contaminante	Descripción
HC	Hidrocarburos
CO	Monóxido de carbono
NOx	Óxidos de nitrógeno
CO ₂	Bióxido de carbono
PM ₁₋₁₀	Partículas desde 1.0 hasta 10.0 μ
Pb	Plomo

SO ₂	Bióxido de azufre
NH ₃	Amoniaco
BENZ	Benceno
MTBE	Metil Terbutil Eter
BUTA	1,3-Butadieno
FORM	Formaldehído
ACET	Acetaldehído
ACRO	Acroleína

4.1.3. Insumos generales

Para estimar los factores de emisión para los contaminantes y tipos de vehículos señalados en las secciones anteriores en un municipio o ciudad particular, MOBILE6 demanda que le sean suministrados una serie de datos que tienen incidencia directa en las emisiones generadas por la flota vehicular del sitio en cuestión. Para algunos de estos insumos, el modelo cuenta con valores predeterminados o *default*, sin embargo, estos valores representan un “promedio nacional” (para Estados Unidos en el caso de la versión original y para México en el caso de MOBILE6-México), por lo que es necesario incorporar al modelo información estimada localmente a fin de que las condiciones del sitio para el que se quiere generar el inventario de emisiones queden reflejadas en los factores de emisión producidos por el modelo.

Algunos de los parámetros de entrada demandados por MOBILE6 se muestran en el Cuadro 4-3. Como mínimo, el usuario debe proveer datos sobre el año calendario, la temperatura ambiental máxima y mínima y la volatilidad del combustible, así como sobre la flota y la actividad vehicular.

Cuadro 4-3. Insumos demandados por MOBILE6

Insumo	Insumo
Año calendario	Fracciones de ventas de vehículos con motor a diesel por clase vehicular y año modelo
Mes	Distribución de kilómetros recorridos por tipo de vía
Temperatura ambiental horaria, o en su defecto máxima y mínima	Distribución de velocidad promedio por hora y tipo de vía
Altitud	Distribución de la longitud de promedio de los viajes
Humedad relativa	Número de arranques por día y tipo de vehículo, distribuido por hora
Día (lunes a viernes o fin de semana)	Tiempo de reposo del vehículo
Características del combustible (presión de vapor, contenido de azufre, contenido de oxigenantes, etc.)	Descripción del programa de inspección y mantenimiento
Distribución de la flota vehicular por clase (Cuadro 4-1), y año modelo	

4.2. Modelo MOVES

Para atender las nuevas necesidades de análisis de emisiones vehiculares, la oficina de transporte y calidad del aire (OTAQ, por sus siglas en inglés), de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, está desarrollando un sistema de modelación de emisiones vehiculares llamado **MO**tor **V**ehicle **E**mission **S**imulator (MOVES), que consiste en una base de datos escrita en Java / MySQL (software para el manejo de bases de datos relacionales). Este modelo es de plataforma múltiple y puede correr en una computadora de escritorio moderna así como en paralelo en múltiples equipos. Este nuevo sistema permite estimar emisiones para un amplio rango de contaminantes, tanto de los vehículos que circulan en carretera como de los vehículos fuera de camino, y permite múltiples escalas de análisis, las cuales van desde intersecciones hasta la estimación de un inventario nacional. Por el momento existen versiones que están en desarrollo; sin embargo, la EPA tiene previsto que cuando MOVES esté totalmente terminado, servirá como reemplazo de los modelos MOBILE6 y NONROAD.

Este nuevo sistema no será necesariamente un solo modelo, sino que abarcará las herramientas, los algoritmos, los datos y los conocimientos necesarios para su uso en todos los análisis de emisiones de fuentes vehiculares asociados al desarrollo de regulaciones, normas, inventarios y proyecciones, tanto regionales como nacionales. Su propósito es facilitar el desarrollo de inventarios de emisiones de fuentes móviles y la evaluación de políticas con mayor resolución y menor incertidumbre que MOBILE6.

Una consideración importante a destacar respecto de MOVES es el hecho de que la versión actualmente disponible al público, MOVES2004, es un modelo que estima únicamente emisiones de gases de efecto invernadero y el análisis del ciclo de vida del combustible, cálculos que se basan en información precargada a nivel condado, estado y país para los Estados Unidos de Norteamérica. Otras versiones posteriores de prueba como el MOVES2006, MOVES2007 y MOVES2008 incorporarán otros contaminantes, como los criterio y el NH₃, y la versión MOVES2009 será la versión final para vehículos en circulación que reemplazará el uso de MOBILE6.2. Más adelante, saldrán las versiones que incorporarán lo relacionado a la estimación de emisiones de las categorías de fuentes móviles cubiertas en este momento por el modelo NONROAD.

4.2.1. Categorías vehiculares

Las emisiones provenientes de vehículos automotores están directamente relacionadas con la actividad y la caracterización vehicular. En MOVES el principal criterio de caracterización es el uso del vehículo y sobre esta base, la flota vehicular en circulación, se clasifica en 13 categorías (Cuadro 4-4) (EPA, 2007). Sin embargo, dado que el modelo estima las emisiones tomando en cuenta no solo el uso de los vehículos sino también las variables que mayor influencia tienen en los patrones de actividad, consumo de energía y generación de emisiones, en su diseño se implementó el concepto de “subcategorías de fuente” (o “*Source bin*” en inglés). Bajo este concepto, los vehículos dentro de cada categoría de uso son reagrupados a partir de criterios como tipo de combustible, tecnología del motor, año modelo y peso del vehículo cargado. El Cuadro 4-5 muestra algunos de los parámetros, dentro de cada criterio, que se emplean en la definición de las subcategorías de fuente (o bins).

Cuadro 4-4. Categorías vehiculares en MOVES

Categorías	Descripción
Vehículos de pasajeros	Automóviles para uso de transporte particular
Camiones de pasajeros ligeros	Minivan, pickups, SUVs y otros vehículos de 2 ejes y 4 llantas utilizados principalmente para transporte personal
Camiones comerciales ligeros	Minivan, pickups, SUVs y otros vehículos de 2 ejes y 4 llantas utilizados principalmente para actividades comerciales. Se considera que estos camiones difieren de los camiones de pasajeros en términos de kilometraje anual recorrido, así como en sus patrones de operación por hora del día.
Camiones recolectores de basura	Camiones de recolección de basura o reciclaje. Se asume que difieren de otros tipos de camión en términos de su calendario de operación, distribución por tipo de vía y operación por hora del día
Camión de trayecto corto	Camiones con menos de 200 millas en su trayecto.
Camión de trayecto largo	Camiones con trayectos de más de 200 millas en su trayecto
Motorhome	Vehículo de motor construido sobre un chasis de camión o de autobús y diseñado para servir como una vivienda autónoma para viajes de recreo
Autobuses de ciudad a ciudad	Autobuses utilizados para el comercio de una ciudad a otra
Autobuses urbanos	Autobuses utilizados dentro de un área urbana
Autobuses escolares	Autobuses de transporte escolar
Camiones con combinación de trayectos cortos	Una combinación de camiones con la mayor parte de su operación con recorridos menores a 200 millas
Camiones con combinación de trayectos largos.	Una combinación de camiones con la mayor parte de su operación con recorridos mayores a 200 millas
Motocicletas	...

Bajo este esquema de caracterización de la flota vehicular, una categoría de fuente o bin es una combinación única de valores. Por ejemplo, todos los vehículos a gasolina con motores de combustión interna convencional, modelos 1993 a 1998, peso del vehículo cargado de entre 2,501 y 3,000 libras y un tamaño de motor menor a dos litros podrían definir una sola categoría de fuente o bin. En general, esta característica de conformar subcategorías o bines le otorga flexibilidad a MOVES para modelar diferentes mezclas de tecnologías vehiculares.

Cuadro 4-5. Elementos considerados en la definición de subcategorías de fuente o bines en la caracterización de la flota vehicular en MOVES

Tipo de combustible	Tecnología del motor	Peso del vehículo cargado (libras)	Tamaño del motor (litros)	Clase regulatoria	Grupo de año modelo*
Gasolina	Combustión interna convencional	<500 (motocicletas)	<2.0	Motocicleta	1972 y ant.
Diesel		500-700 (motocicletas)	2.1-2.5	LDV	1973
			3.1-3.5	HDG	1975
Gas Natural Comprimido – GNC	Combustión interna avanzada	>700	3.5-4.0	PBV ≤14000 lbs	
		≤2000	4.1-4.5	HDG	1999
Gas Licuado de Petróleo - GLP	Híbrido con combustión interna	2001-2500	4.5-5.0	PBV >14000 lbs	2000
		2501-3000	>5.0	LHDD	2001-2010
		3001-3500		MHDD	2011-2020
		3501-4000		HHDD	2021 y post.
		4001-4500		Autobuses urbanos	
Etanol	avanzada	4501-5000			
Metanol	Celda de combustible	26,001-33,000			
		33,001-40,000			
Hidrógeno gaseoso	Eléctrico	40,001-50,000			
		50,001-60,000			
		60,001-80,000			
Hidrogeno liquido		80,001-100,000			
Electricidad		100,001-130,000			
		≥130,001			

* Estos grupos de año modelo corresponden a los que se utilizan para estimar las emisiones de metano y óxido nítrico. Para estimar el consumo de energía y las emisiones para otros contaminantes los grupos de año modelo son diferentes.

A diferencia de MOBILE6, que sólo considera la generación de factores de emisión para vehículos que circulan en carretera, MOVES esta siendo diseñado para estimar las emisiones provenientes tanto de los vehículos que circulan en carretera como de los vehículos fuera de camino. Esta estimación considera tanto las emisiones provenientes por el escape como las evaporativas, además de las emisiones de partículas por el desgaste de los frenos, desgaste de las llantas, etc.

4.2.2. Contaminantes

La primera versión de MOVES, conocida como MOVES4 o MOVES2004, únicamente estima emisiones de óxido nitroso, metano y bióxido de carbono, conocidos gases de efecto invernadero, en función del consumo de combustibles por tipo de vehículo. Sin embargo, como ya se ha dicho anteriormente, las futuras versiones de MOVES incluirán la opción de estimar emisiones de contaminantes criterio: hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y material particulado. En MOVES2008 se incluye la estimación de contaminantes tóxicos, amoniaco, y dióxido de azufre. Este último contaminante es estimado en función del contenido de azufre en los combustibles y el resto de los contaminantes mediante factores de emisión generados por el MOBILE6 (Cuadro 4-6). Finalmente, MOVES será capaz de estimar las emisiones para todos estos contaminantes por hora del día, día de la semana, o mes, para fechas desde 1999 hasta 2050 (EPA, 2005).

Cuadro 4-6. Contaminantes considerados en las diferentes versiones de MOVES

Contaminantes			Descripción
MOVES2004*	MOVES2006/7	MOVES2008	
N ₂ O	N ₂ O	N ₂ O	Óxido nitroso
CH ₄	CH ₄	CH ₄	Metano
CO ₂	CO ₂	CO ₂	Bióxido de carbono
	HC	HC	Hidrocarburos
	CO	CO	Monóxido de carbono
	NO _x	NO _x	Óxidos de nitrógeno
	PM	PM	Partículas
		SO ₂	Bióxido de azufre
		NH ₃	Amoniaco
		Contaminantes tóxicos	

* Versión actualmente disponible al público

4.2.3. Insumos generales

Para estimar las emisiones de contaminantes generadas por cada categoría de fuente, MOVES incluye valores preestablecidos. Sin embargo, estos valores son representativos de la flota vehicular de los Estados Unidos, por lo que es necesario incorporar información que caracterice adecuadamente las condiciones del sitio de interés si se desea aplicar en otro país. Una lista corta de los parámetros de entrada demandados por MOVES son mostrados en el Cuadro 4-7.

Cuadro 4-7. Insumos demandados por MOVES

Insumo	Insumo
Año calendario base	Crecimiento promedio de la flota vehicular del año base al año de análisis. Esto sólo aplica si el año base es un año futuro.
Mes	Distribución de kilómetros recorridos por tipo de vehículo, tipo de vía, año modelo y hora del día.
Temperatura ambiental	Distribución de velocidad promedio por hora y tipo de vía
Humedad relativa	Distribución del número de arranques del vehículo, por tipo de vehículo, año modelo y hora del día
Formulación del combustible (presión de vapor, contenido de azufre, contenido de oxigenantes, etc.)	Tiempo de reposo del vehículo, por tipo de vehículo, año modelo y hora del día
Población vehicular por tipo y año modelo para el año base (de acuerdo con los Cuadros 4-4 y 4-5)	Descripción del programa de inspección y mantenimiento

4.3. Modelo IVE

El modelo internacional de emisiones vehiculares (IVE) es un programa en lenguaje JAVA que permite la estimación de las emisiones de contaminantes criterio, contaminantes tóxicos y gases de efecto invernadero provenientes de vehículos automotores que circulan por carretera, considerando tanto las emisiones provenientes del escape como las evaporativas.

IVE fue desarrollado por la Universidad de California en Riverside, el Colegio de Ingeniería del Centro para la Investigación Ambiental y Tecnología, el Centro Internacional de Investigación en Sistemas Sustentables y la empresa Investigación en sistemas globales sustentables, con fondos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

El concepto de desarrollo del modelo IVE fue el de proveer a países en vías de desarrollo de una herramienta de estimación rápida del inventario de emisiones de vehículos en circulación, con el que además las autoridades pudieran evaluar estrategias de control y planeación de transporte. Considerando la insuficiente disponibilidad de datos en algunos países en vías de desarrollo y la falta de experiencia para usar de manera apropiada los modelos de emisiones más complejos, IVE fue diseñado para:

- Ser fácil de entender y usar
- Ser flexible en su uso
- Adaptarse a cualquier país
- Demandar pocos insumos
- Utilizar mediciones de campo
- Generar resultados “consistentes” con MOBILE6 (Ver manual de IVE)

De acuerdo con los resultados de un análisis comparativo de los resultados generados con diferentes modelos comúnmente empleados en la estimación de emisiones generadas por fuentes vehiculares, el modelo IVE genera resultados $\pm 10\%$ diferentes respecto a las estimaciones generadas a partir del uso de los factores de emisión obtenidos con MOBILE6 (GSRR, 2004):

IVE ha sido utilizado para generar inventarios de emisiones vehiculares en ciudades como Shanghai y Beijing (China), Pune (India), Sao Paulo (Brasil), Lima (Perú), Santiago (Chile), Nairobi (Kenia), Almaty (Kazakhstan) y Los Ángeles (Estados Unidos). En México, se han desarrollado varios estudios desde el año 2004, para generar información local en la Ciudad de México (Davis, et al., 2004).

4.3.1. Categorías vehiculares

IVE es un modelo que estima las emisiones generadas por automóviles, motocicletas, camiones y autobuses. En lo particular, contempla un total de 7 categorías vehiculares, 1372 tecnologías predefinidas y 45 tecnologías adicionales no definidas. Las tecnologías predefinidas están agrupadas conforme a los siguientes parámetros:

- Tamaño del vehículo (7 subcategorías incluyendo camiones)
- Tipo de combustible (5 subcategorías)
- Uso del vehículo (3 subcategorías)
- Sistema de alimentación del combustible (3 subcategorías)
- Sistemas de control de emisiones evaporativas (varias subcategorías)
- Sistemas de control de emisiones por escape (varias subcategorías)

El Cuadro 4-8 detalla algunos de los criterios usados para definir las tecnologías vehiculares en el modelo IVE.

Cuadro 4-8. Criterios para definir las categorías vehiculares en IVE

Tipo de combustible	Alimentación del combustible	Uso del Vehículo	Tecnología de control de emisiones	Sistema de recuperación de vapores
Gasolina	Carburador	Menos de 79,000 Km..	Convertidor catalítico de dos vías	Sin control
Diesel	Inyección electrónica central o monopunto	Entre 80,000 y 161,000 Km..	Convertidor catalítico de tres vías	Válvula de ventilación positiva
Gas Natural Comprimido - GNC				Válvula de ventilación positiva y control en el tanque de combustible
Gas Licuado de Petróleo - GLP	Inyección electrónica múltiple	Más de 161,000 Km..	Vehículos de baja emisión	Control de emisiones evaporativas
Etanol			EURO I, II, III, IV y V	

Al igual que en MOVES, una categoría vehicular es una combinación única de valores. Por ejemplo, una categoría vehicular pudiera quedar definida por todos los vehículos ligeros (con peso bruto vehicular inferior a 2,268 kilogramos), a gasolina con alimentación de combustible vía carburador, sin sistemas de control de emisiones, con menos de 79,000 kilómetros recorridos y tamaño de motor inferior a 1.5 litros. De manera similar a lo que ocurre con MOVES, esta flexibilidad en la definición de las categorías vehiculares le otorga a IVE la posibilidad de estimar las emisiones de diferentes mezclas de tecnologías vehiculares.

Cuadro 4-9. Ejemplo de algunas categorías vehiculares en IVE

Categoría vehicular	Descripción
Automóvil/Camión ligero a gasolina; ligero	Son vehículos de pasajeros y camiones, a gasolina, de peso ligero (PBV \leq 2268 Kg.), con un tamaño de motor menor a 1.5 litros
Automóvil/Camión ligero a gasolina; mediano	Son vehículos de pasajeros y camiones, a gasolina, de peso medio (2993Kg. $>$ PBV $>$ 2268 Kg.), con un tamaño de motor menor a 3 litros
Automóvil/Camión ligero a gasolina; pesado	Son vehículos de pasajeros y camiones, a gasolina, pesados (4082Kg. $>$ PBV $>$ 2993 Kg.), con un tamaño de motor mayor a 3 litros
Automóvil/Camión ligero a diesel; ligero	Son vehículos de pasajeros y camiones, a diesel, de peso ligero (PBV \leq 2268 Kg.), con un tamaño de motor menor a 1.5 litros
Automóvil/Camión ligero a diesel; mediano	Son vehículos de pasajeros y camiones, a diesel, de peso medio (2993Kg. $>$ PBV $>$ 2268 Kg.), con un tamaño de motor menor a 3 litros
Automóvil/Camión ligero a diesel pesado	Son vehículos de pasajeros y camiones, a diesel, pesados (4082Kg. $>$ PBV $>$ 2993 Kg.), con un tamaño de motor mayor a 3 litros
Camión/autobús; ligero	...

El Cuadro 4-9 muestra un breve listado de las categorías vehiculares consideradas por IVE. Es importante destacar, sin embargo, que las categorías listadas corresponden a las utilizadas para caracterizar la flota vehicular de la ZMVM, dentro del estudio desarrollado en esta zona para adaptar el modelo IVE a las condiciones de esta parte del país (Davis, et al., 2004).

4.3.2. Contaminantes

El modelo IVE estima las emisiones tanto de contaminantes criterio como de contaminantes tóxicos y gases de efecto invernadero. El listado detallado de las especies químicas para las cuales IVE es capaz de estimar las emisiones para las diferentes categorías vehiculares es mostrado en el Cuadro 4-10.

Cuadro 4-10. Contaminantes considerados en IVE

Contaminante	Descripción
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
CO	Monóxido de carbono
NOx	Óxidos de nitrógeno
PM ₁₀	Partículas con diámetro menor a 10µ
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxido nitroso
NH ₃	Amoníaco
BENZ	Benceno
BUTA	1,3-Butadieno
ALD	Aldehídos

4.3.3. Insumos generales

Para estimar el inventario de emisiones para la región de interés, tomando en cuenta los tipos de contaminantes y categorías vehiculares señaladas en las secciones anteriores, IVE requiere los insumos que se muestran en el Cuadro 4-11.

Cuadro 4-11. Insumos requeridos por IVE

Insumo	Insumo
Temperatura ambiental	Uso del aire acondicionado
Humedad relativa	Distribución de la flota vehicular por tecnología (de acuerdo con el Cuadro 5-8)
Altitud	Desglose detallado de actividad (KRV) por categoría vehicular
Información sobre características de la gasolina (azufre, plomo, benceno y oxigenantes)	Número de arranques, por día y categoría vehicular, y tiempo entre arranques consecutivos
Información sobre características del diesel (azufre)	Factores de emisión para cada tecnología bajo las condiciones locales de operación
Programa de inspección y mantenimiento	

4.4. Modelo COPERT

El sistema de modelación de emisiones vehiculares llamado **CO**mputer **P**rogramme to **C**alculate **E**missions from **R**oad **T**ransport (COPERT) es un programa elaborado en Visual Studio.NET 2003 de Microsoft y funciona en cualquier PC con Windows. Fue desarrollado como herramienta europea para calcular las emisiones provenientes tanto de vehículos en circulación como de vehículos fuera de camino (equipos con motores de combustión interna empleados en agricultura, silvicultura, residencial, industria, barcos y ferrocarriles). Es importante destacar que COPERT fue diseñado específicamente para estimar emisiones de vehículos fabricados de acuerdo con la legislación europea.

El desarrollo de COPERT fue financiado por la Agencia Europea de Medioambiente (EEA, por sus siglas en inglés), en el marco de las actividades del centro europeo de asuntos del aire y cambio climático. Actualmente está en uso a nivel nacional en Bélgica, Bosnia, Croacia, Chipre, Dinamarca, Eslovenia, España, Estonia, Francia, Grecia, Irlanda, Italia, Luxemburgo y Moldavia. Sin embargo, muchos otros países de la Unión Europea han preferido utilizar sus propios modelos, que son más complejos y precisos que este modelo genérico.

La metodología de COPERT permite la compilación de inventarios nacionales anuales; sin embargo, se ha demostrado que también se puede utilizar, con un suficiente grado de certeza, para la compilación de inventarios de emisiones urbanos hasta con una resolución espacial de 1x1 Km.² y una resolución temporal de 1 hora.

4.4.1. Categorías vehiculares

COPERT estima emisiones generadas por vehículos a gasolina (con y sin plomo), diesel y GLP para seis categorías básicas de vehículos (Ver cuadro 4-12).

Cuadro 4-12. Categorías vehiculares en COPERT

Categoría vehicular	Descripción
Vehículos de pasajeros	Vehículos para el transporte de pasajeros que no poseen más de 8 asientos en adición al del conductor
Vehículos ligeros	Vehículos para el transporte de bienes y con un peso no mayor a 3.5 toneladas
Vehículos pesados	Vehículos para el transporte de bienes y con un peso mayor a 3.5 toneladas
Autobuses urbanos	Vehículos para el transporte de pasajeros, con más de 8 asientos en adición al del conductor
Motonetas y motocicletas	Vehículos de 2 o 3 ruedas con motor de menos de 50cc y diseñado

	para no exceder una velocidad de 40 Km../h
Motocicletas	Vehículos de 2 o 3 ruedas con motor de más de 50cc y diseñado para correr a una velocidad superior a 40 Km../h

Con el objeto de hacer una estimación de emisiones vehiculares más precisa, a partir de las categorías indicadas en el Cuadro 4-12, COPERT puede construir subcategorías vehiculares con base en criterios tales como: tipo de combustible, peso del vehículo, tamaño del motor, tecnología del motor, etc. El Cuadro 4-13, muestra algunas de las consideraciones específicas, dentro de cada criterio, que se emplean en la construcción de las subcategorías en COPERT.

Cuadro 4-13. Elementos considerados en la definición de subcategorías en COPERT

Tipo de combustible	Peso del vehículo (toneladas)	Tamaño del motor (litros)	Tecnología del motor
Gasolina	< 3.5	<1.4	PRE ECE*
	> 3.5	1.4 – 2.0	ECE 15/00-01
Diesel	> 7.5	> 2.0	ECE 15/02
	7.5 – 16		
Gas Licuado de Petróleo	16 -32		EURO III
	> 32		EURO IV
			EURO V

*Comité Económico para Regulaciones Europeas 15 (ECE, por sus siglas en inglés)

Con este esquema de agregación de la flota vehicular, una subcategoría podría quedar conformada por todos los vehículos ligeros a gasolina, con motor de menos de 1.4 litros que cumple con la legislación establecida para los vehículos con tecnología EURO IV. El número de subcategorías preestablecidas en COPERT III es de 48, sin embargo, esta cifra puede variar de acuerdo a las necesidades del usuario.

4.4.2. Contaminantes

El Cuadro 4-14 muestra la lista completa de especies químicas para las cuales COPERT es capaz de estimar el inventario de emisiones de fuentes vehiculares. Una característica de este modelo es su capacidad para proporcionar información desagregada por especie sobre las emisiones de hidrocarburos (propano, butano, isobutano, etileno, etc.).

Cuadro 4-14. Contaminantes considerados en COPERT

Contaminante	Descripción
COV	Compuesto Orgánicos Volátiles
CO	Monóxido de carbono
NOx	Óxidos de nitrógeno
PM	Partículas (diferentes diámetros)

CO ₂	Bióxido de carbono
CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxido nitroso
NH ₃	Amoniaco
SO ₂	Bióxido de azufre
HAP	Hidrocarburos Aromáticos Poli cíclicos
COP	Contaminantes Orgánicos Persistentes
Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Se y Zn	Metales pesados: plomo, cadmio, cromo, cobre, níquel, selenio y zinc, respectivamente.

4.4.3. Insumos generales

Para estimar el inventario de emisiones para la región de interés, COPERT demanda que le sean suministrados los insumos que se muestran en el Cuadro 5-15.

Cuadro 5-15. Insumos demandados por COPERT

Insumo	Insumo
Temperatura máxima y mínima mensual	Distribución de kilómetros recorridos por tipo de vehículo y de vía
Características del combustible (presión de vapor, contenido de azufre, contenido de oxigenantes, contenido de plomo, relación hidrógeno-carbón, etc.)	Distribución de velocidad promedio por tipo de vehículo y de vía
Datos sobre consumo de combustible	Distribución del número de arranques por tipo de vehículo
Descripción del programa de inspección y mantenimiento	Distribución de la longitud promedio de los viajes
Distribución de la flota vehicular por clase	

4.5. Diferencias entre modelos

Como se desprende de las secciones anteriores, el común denominador en los modelos descritos es el hecho de que requieren como insumos información que caracterice a la flota vehicular, la actividad vehicular y los factores de emisión acordes a las condiciones de manejo en la región de interés; sin embargo, también existen diferencias. Por ejemplo, mientras que con algunos modelos como MOBILE6 sólo es posible estimar factores de emisión, con otros como MOVES, IVE y COPERT, es factible estimar de manera directa los inventarios de emisiones de fuentes vehiculares con diferentes niveles de resolución espacial y temporal. Igualmente, destaca que modelos como MOBILE6 y MOVES fueron desarrollados atendiendo, principalmente, a las características tecnológicas y estándares de emisión de la flota vehicular de los Estados Unidos de Norteamérica, en tanto que COPERT considera la tecnología y los estándares de emisión vigentes en la Unión Europea e IVE puede incluir ambos.

A nivel operativo, las diferencias más significativas entre estos modelos se dan en la forma de caracterizar tanto a la flota vehicular como su actividad. Por ejemplo, entre más elementos o criterios se consideren en la caracterización de la flota y ésta vaya acompañada de datos de actividad específicos para cada una de ellas bajo diferentes condiciones de operación, mayor precisión se tendrá en la estimación del inventario de emisiones. Esto es, modelos como COPERT, MOVES e IVE pueden dar paso a la integración de inventarios de emisiones más confiables y precisos que los generados con base en MOBILE, si se cuenta con suficiente información que permita caracterizar apropiadamente la flota y la actividad vehicular de acuerdo a las condiciones de operación de los vehículos en el sitio de interés.

En general, las principales diferencias observadas entre las versiones actualmente disponibles al público de los modelos descritos en este capítulo se resumen en el Cuadro 4-16.

4.6. Conclusiones y sugerencias

Todos los modelos descritos en este capítulo son ampliamente conocidos y tienen una gama extensa de datos preestablecidos que permiten que las estimaciones de inventarios de emisiones vehiculares sean realizadas con niveles aceptables de incertidumbre y relativamente poca colección de datos en campo. Sin embargo, la aplicación de datos preestablecidos en otros países o regiones puede conducir a la estimación de inventarios con grandes incertidumbres, salvo que haya una fuerte labor para recalibrarlos y modificarlos de tal forma que reflejen las condiciones locales.

La carencia de un modelo de emisiones vehiculares alimentada con datos locales limita la capacidad de los tomadores de decisiones para diseñar y evaluar el impacto potencial de diferentes estrategias de control. Esto se debe a que en la medida que avanza el nivel de complejidad de las estrategias de control, la necesidad de contar con información de mejor calidad aumenta. Por ello, en México se han realizado esfuerzos importantes por recolectar información de campo local y adaptar modelos como MOBILE6 e IVE a las condiciones del país.

En cuanto a la selección de la mejor herramienta de estimación de emisiones vehiculares, un criterio clave es el propósito final que tendrá el inventario generado. Por ejemplo, si el objetivo final es apoyar la toma de decisiones con base en la

identificación de si una propuesta mejorará o empeorará alguna condición (la dirección “±” del cambio), un modelo sencillo con calibración limitada puede ser suficiente para este fin. Pero si el propósito es evaluar el impacto de una intervención anterior, se tendrá que determinar la diferencia entre dos inventarios (antes y después de la intervención) y por ello el intervalo de confianza en cada inventario debe ser suficientemente alto para poder demostrar con validez estadística si existe alguna diferencia y de qué magnitud es ésta.

En general, como ya se ha dicho anteriormente, existe una relación inversa entre la incertidumbre asociada con el resultado de un inventario y la complejidad y costo involucrados en su desarrollo. Por tanto, si algún usuario identifica casos particulares para los cuales le resulta conveniente la aplicación de algún modelo en específico, se recomienda hacer uso de la herramienta deseada, pues es claro que todas tienen ventajas y desventajas y que, en algún momento dado, pueden resultar útiles para aplicaciones específicas.

Cuadro 4-16. Diferencias entre modelos

Modelo	Alcance geográfico			Tipo de análisis		Contaminantes				No. de categorías vehiculares	Tipos de fuentes		Tipos de combustible								Especificaciones Tecnológicas		
	Municipal	Estatal o regional	Nacional	Factores de emisión	Inventario de emisiones	Regulados ^a	Tóxicos ^b	Efecto invernadero ^c	Otros ^d		En circulación	Fuera de camino	Gasolina	Diesel	GNC	GLP	Etanol	Metanol	H ₂ gaseoso	H ₂ líquido	Electricidad	Estados Unidos	Europa
MOBILE6	X	X	X	X		X	X	X ^e	X	28	X		X	X	X							X	
MOVES4	X	X	X		X			X		13	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
IVE	X	X	X		X	X	X	X	X	7	X		X	X	X	X	X					X	X
COPERT	X	X	X		X	X	X	X	X	6	X	X	X	X		X							X

a: Para efectos de este documento los contaminantes regulados son; CO, NOx, HC, PM

b: En esta categoría se considera a cualquiera de los siguientes contaminantes o grupos de contaminantes: Benceno, Metil Terbutil Eter, 1,3-Butadieno, Formaldehído, Acetaldehído, Acroleína, HPA y/o COP

c: Los gases de efecto invernadero referidos son; CO₂, N₂O y CO₂

d: En esta categoría se considera cualquier otro contaminante o grupo de contaminantes, tal como SO₂, NH₃, Pb, etc.

e: MOBILE6 sólo es capaz de estimar factores de emisión para CO₂

5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DEL INVENTARIO

En términos de la gestión de la calidad del aire, tanto para implementación como para evaluación de medidas, es imprescindible contar con inventarios de emisiones de suficiente calidad para guiar las acciones de control hacia las fuentes que mayormente contribuyen a las emisiones. Así, las exigencias de calidad del inventario dependen de sus usos y propósitos y están determinadas por los insumos y herramientas utilizadas en la estimación del inventario.

Las siguientes secciones de este capítulo brindan información general sobre las principales fuentes de incertidumbre asociadas tanto con el uso de modelos para estimar emisiones vehiculares como con los datos que alimentan a dichos modelos, así como sobre la incertidumbre asociada debido a las características propias de los inventarios. En este capítulo se proporciona también información general sobre el impacto de la incertidumbre en los resultados. Así mismo, se describe, con fines de orientación, un procedimiento de evaluación cualitativa de un inventario de emisiones vehiculares, basado en el conocimiento del origen y calidad de los insumos utilizados en su estimación.

5.1. Incertidumbre en la información y herramientas

El proceso de generación de emisiones en un motor de combustión interna y su sistema de regulación y control es complicado, ya que las emisiones de los diferentes contaminantes obedecen a diferentes factores. Por ejemplo, mientras las emisiones del bióxido de carbono dependen de la integración completa de la potencia generada por el motor durante todo su ciclo de operación, la generación de NO_x y partículas dependen de aceleraciones y carga instantánea, así como de la temperatura y presión en la cámara de combustión.

Es por ello que se requiere modelar estas condiciones y es determinante contar con insumos confiables y estadísticamente representativos de los vehículos y de su actividad en la zona. A continuación se abordará con mayor detalle la incertidumbre asociada con el uso de modelos y con sus insumos, indicando las fuentes de incertidumbre y sus posibles impactos en los resultados de la estimación.

5.1.1. Incertidumbre asociada con el modelo de emisiones

Por definición, un modelo es una simplificación de la realidad y, por lo tanto, sus resultados son una aproximación de lo que realmente ocurre. En la medida que han avanzado los conocimientos sobre la emisión de contaminantes en vehículos automotores en circulación, se han ido mejorando los modelos y acercando más a la realidad. Dado que no existe un estándar para comparar las estimaciones de un modelo contra otro, se han realizado pruebas comparativas para determinar el rango de incertidumbre por cada contaminante. Se estima, por ejemplo, que en general la incertidumbre es más baja para CO₂ y consumo de combustible (logrando un rango de 3-10%) y más alta para NO_x y PM (hasta más de 50% para algunos años modelo de vehículos) (Giannelli, R.A. et al., 2002)

Además, en muchos modelos de la generación actual, como MOBILE y COPERT, se trata de captar el cambio en los factores de emisión asociado a las diferentes condiciones de operación del motor (en tráfico pesado, en tráfico ligero y en condiciones de tránsito fluido), a través de la definición de una velocidad promedio de manejo por tipo de vía. En tanto que en modelos más recientes, como MOVES e IVE, en lugar de captar este efecto vía la expresión de una velocidad promedio por tipo de vialidad, se define una matriz de esfuerzo del motor contra velocidad, lo que permite captar el manejo transitorio con mayor precisión.

Esto significa que no solo existen variaciones entre lo modelado y la realidad, sino que puede haber diferencias entre las estimaciones hechas por diferentes modelos, incluso partiendo de una misma base de datos. Esto se debe, en parte, a:

- El diseño del modelo: todos los modelos simplifican la realidad; sin embargo, los modelos que tienden a ser más sencillos de utilizar y requerir menor cantidad de información, normalmente hacen supuestos gruesos y aproximaciones, involucrando una mayor incertidumbre en sus resultados. Al contrario, los modelos más completos y que proporcionan estimaciones más detalladas y cercanas a la realidad tienden a ser mucho más complejos en su utilización y requerir muchos insumos. Por todo lo anterior, es crítico encontrar un balance en la complejidad de los modelos para que no sean demasiado sencillos (con gran incertidumbre) ni demasiado complejos (con grandes requerimientos de información).

- Los factores de emisión base: generalmente son obtenidos a través de miles de mediciones directas realizadas en diferentes lugares (con dinamómetro y con medición a bordo bajo condiciones normales de circulación), y acarrear incertidumbre debido, entre otros factores, a:
 - Variaciones, a veces sustanciales, de emisiones entre vehículos similares pero en condiciones mecánicas diferentes,
 - Variaciones en el manejo transitorio del vehículo (en tráfico pesado, en tráfico ligero y en condiciones de tránsito fluido), entre prueba y prueba,
 - Incertidumbres propias de las mediciones directas, y;
 - Diferencias entre las condiciones locales de operación y las condiciones consideradas en las pruebas con dinamómetro.

- Datos predeterminados: generalmente los modelos contienen datos predeterminados o precargados que facilitan el uso del modelo; sin embargo, estos datos pueden no representar la realidad en alguna zona o año en particular. Cuando los datos predeterminados se refieren a una ciudad o región muy diferente a la cual se estudia, las incertidumbres pueden ser mucho mayores que cuando estos datos provienen de la propia ciudad en el que se desea utilizarlos o una ciudad similar. Por ejemplo, correr un modelo para una ciudad latinoamericana con datos preestablecidos para una metrópoli de los Estados Unidos no podrá generar resultados congruentes o una estimación válida para la ciudad objeto de estudio. Típicamente los modelos desarrollados por y para los Estados Unidos, como MOBILE y MOVES, cuentan con datos preestablecidos para ciudades o regiones de ese país; mientras que los modelos desarrollados para Europa, como COPERT, cuentan con datos preestablecidos para Europa. Por su parte, IVE fue elaborado para países en vías de desarrollo y no contiene muchos valores preestablecidos.

En México, pocas ciudades cuentan con informaron suficiente para alimentar un modelo complejo con todos los datos requeridos como insumos determinados localmente; por lo tanto, es importante identificar modelos cuyos valores preestablecidos han sido modificados para adecuarlos a los condiciones del país, como es el caso de las versiones mexicanas de MOBILE e IVE, en tanto que se generen las mediciones locales y la información de campo necesaria para cada ciudad.

5.1.2. Incertidumbre en los datos de entrada a un modelo de emisiones

Los usuarios que pretenden obtener una estimación del inventario de emisiones con una incertidumbre baja deben, tanto como sea factible, alimentar los datos requeridos por el modelo con información que refleje sus condiciones locales. Sin embargo, considerando que no siempre se cuenta con los recursos suficientes como para generar de manera local todos los insumos demandados por un modelo, se debe priorizar su generación con base en el impacto que cada insumo tiene en los resultados finales de un inventario de emisiones. No todas las variables tienen el mismo impacto en los valores finales del inventario. Por ello, es más importante utilizar datos locales para las variables de mayor impacto y, cuando no se cuenta con estos datos, es recomendable hacer un análisis de sensibilidad que muestre las tendencias de variación en las emisiones utilizando diferentes datos preestablecidos o datos disponibles para otras ciudades con condiciones semejantes. A continuación se presentan tres grandes grupos de datos generalmente demandados por los modelos, de acuerdo con su relevancia en términos de los resultados de la estimación.

a) Parámetros con impacto crítico

Se estima los cambios en cualquiera de estos parámetros podrían producir impactos en las emisiones totales estimadas de al menos un 20%, por cada variable (Giannelli, R.A., et al, 2002). Es por ello que se considera que el utilizar datos preestablecidos para estas variables, sobre todo de otros países o regiones, puede comprometer significativamente la integridad del inventario.

- **Tamaño total de la flota:** El inventario de emisiones mantiene proporción con el tamaño de la flota vehicular activa. Esto significa que aún conservando la caracterización vehicular de acuerdo al tipo de vehículo, edad, kilometraje acumulado, etc. las emisiones variarán de acuerdo al número total de vehículos que componen la flota en el área de interés.
- **Acumulación anual del kilometraje por clase de vehículo:** Los vehículos acumulan kilometraje dependiendo de su tipo y edad. Por ejemplo, los vehículos de uso intensivo (vehículos de reparto de mercancía y de transporte público de pasajeros), típicamente acumulan más kilómetros por año que los automóviles de uso particular. Igualmente, el kilometraje anual de vehículos viejos suele ser menor que el de los más nuevos.

- Distribución de kilómetros viajados por tipo del camino: Cada uno de los diferentes tipos de camino (autopista, arterial, local residencial o rural etc.) implica diferentes condiciones de manejo, de actividad vehicular y emisiones, por lo que la correcta estimación de los KRV totales en cada uno es crítica.
- Distribución por año modelo dentro de cada categoría vehicular: Definir el nivel tecnológico del vehículo, de acuerdo con las normas vigentes para vehículos nuevos en su fecha de fabricación, es un parámetro crítico para establecer los cambios registrados en las emisiones de un vehículo de acuerdo con el grado de deterioro de su motor y del sistema de control de emisiones.
- Distribución de velocidad promedio por tipo de camino: El comportamiento transitorio del vehículo, reflejado en la demanda de potencia del motor debido a las tasas de aceleración y velocidades de manejo, tiene un efecto significativo en sus emisiones. Se considera que, al menos, deben estimarse las velocidades promedio por tipo de vía y por hora del día.
- Temperatura (mínima/máxima): La temperatura ambiental es importante debido a que si ésta aumenta, aumentan también las emisiones vehiculares evaporativas. Normalmente se utilizan las temperaturas máximas y mínimas diarias; sin embargo, es mejor tener información horaria sobre esta variable.
- Características del combustible (presión del vapor de Reid): La volatilidad de la gasolina tiene un efecto significativo en las emisiones evaporativas de las fuentes vehiculares. La volatilidad de la gasolina es indicada por la presión de vapor de Reid (RVP) del combustible utilizado.

b) Parámetros con impacto relevante

Cualquier cambio en los datos relativos a estas variables puede generar diferencias de entre 5 y 20% en las estimaciones del inventario (Giannelli, R.A., et al., 2002). El uso de datos preestablecidos para estas variables, sobre todo de otros países o regiones, no es recomendable.

- Altitud: La altitud sobre el nivel del mar tiene mayor efecto en las emisiones de vehículos viejos que en los de tecnología reciente. Esto se debe tomar en cuenta para aquellos vehículos que operan habitualmente en altitudes superiores a los 1200 metros sobre el nivel de mar, ya que a esta altura existe menor cantidad de oxígeno, haciendo más difícil la combustión y, por tanto, generando más emisiones.

- Humedad relativa: La humedad tiene un impacto importante en las emisiones de NOx debido al efecto del vapor de agua en las temperaturas de la cámara de combustión del motor.
- Uso del aire acondicionado: La presencia de humedad relativa alta normalmente provoca un aumento en el uso del aire acondicionado en climas calientes. Se sabe que el uso del aire acondicionado puede tener un impacto en las emisiones de HC, NOx, y CO.
- Número de arranques diarios por tipo de vehículo: Las emisiones que ocurren inmediatamente después de un arranque en frío del motor pueden explicar una parte significativa de las emisiones totales de un vehículo. Se puede decir que estas emisiones prácticamente no están controladas dado que al encontrarse fríos tanto el vehículo como el convertidor catalítico, la eficiencia de éste último es muy baja. Por ello, resulta importante recopilar información sobre el número promedio de arranques de un vehículo a lo largo de un día; se considera que hay por lo menos un arranque del motor para cada viaje y cualquier destino intermedio dará lugar a otro arranque. Así, si el tiempo transcurrido desde que se apagó el motor hasta que se vuelve a arrancar es suficiente para permitir que el convertidor catalítico se enfríe, el arranque siguiente se considera como arranque en frío.

c) Parámetros con impacto menor

Estos parámetros tienen un impacto menor en la estimación de las emisiones; es por ello que es posible utilizar datos preestablecidos para estas variables teniendo menos impacto en el resultado final de un inventario de emisiones. Entre los parámetros con menor impacto figuran los siguientes:

- Año calendario analizado
- Mes analizado
- Día laboral o de fin de semana analizado
- Distribución del tiempo de reposo por hora del día
- Distribución del tiempo de actividad por hora del día
- Distribución de la distancia promedio de cada viaje
- Efectividad del programa de verificación vehicular
- Descripción del programa de inspección de emisiones durante la recarga de combustible

5.2. Incertidumbre de un inventario por sus características

La estimación de las emisiones de fuentes móviles es, como ya ha quedado evidenciado, de por sí compleja y a menudo costosa. Es por ello que una gran inversión de recursos y tiempo debe verse reflejada en los esfuerzos por reducir la incertidumbre del inventario. Además de la incertidumbre asociada con el uso de modelos y con la calidad de los datos o insumos para la modelación, la incertidumbre también puede estar determinada por elementos o características propias del inventario, como lo son su precisión geográfica o granularidad, el nivel requerido de confianza y la precisión deseada en la magnitud. A continuación se describe cada uno.

5.2.1. Precisión geográfica (granularidad)

Este elemento básicamente se refiere a la escala o cobertura geográfica que se desea cubrir al momento de generar un inventario de emisiones de fuentes vehiculares. En este contexto, existen tres grandes escalas de cobertura:

- **Macroescala:** se refiere a inventarios con una cobertura geográfica amplia, como por ejemplo un estado o un país, y con una resolución de tiempo de un año o un mes.
- **Mesoescala:** son inventarios más refinados en su cobertura geográfica, normalmente son a nivel local o para una zona urbana, y con una resolución de tiempo de un día o una hora.
- **Microescala:** son estimaciones muy focalizadas, pueden ser análisis de emisiones de una intersección de vías o un grupo específico de tramos de vía, y con una resolución de tiempo de una hora o menos.

Un inventario de mesoescala o microescala requiere más datos específicos que un inventario de macroescala; mientras más fina sea la granularidad, mas grande es la incertidumbre debido al uso de datos predeterminados (*default*). Modelos como IVE, MOBILE o COPERT, que originalmente fueron desarrollados para generar inventarios a macroescala, han sido mejorados a través del tiempo y sus versiones más recientes han sido aplicadas exitosamente en la generación de inventarios de emisiones a mesoescala y aún, en algunos casos, a nivel de microescala. Sin embargo, un factor importante para que esto haya sido posible es el hecho de que los datos demandados

como insumos por los modelos (factores de emisión predeterminados, caracterización de la flota y actividad vehicular), han sido desarrollados con un mayor nivel de detalle y atendiendo específicamente a esta nueva necesidad de modelación a escala más fina.

5.2.2. Nivel requerido de confianza

Como se ha dicho anteriormente, existe una relación inversa entre la reducción de la incertidumbre en los resultados y la complejidad y costo de obtenerlos. Finalmente, es el responsable de la generación de la información quién deberá elegir los datos y herramientas que le proporcionen el nivel requerido de confianza, de acuerdo con los usos que se pretenda dar a los resultados. Por ejemplo, en el contexto del MDL de la UNFCCC, para poder acceder a los bonos de carbono se requiere una verificación internacional y la certificación de la reducción de emisiones utilizando una metodología precisa y estandarizada.

5.2.3. Precisión deseada en la magnitud

Los inventarios de emisiones de fuentes móviles tienen diversos usos, entre los más comunes se encuentran el determinar la contribución de diversos tipos de fuentes móviles al inventario total, o el determinar el impacto o cambio en las emisiones derivado de una medida específica o intervención en el sector transporte. En el primer caso, es aceptable un nivel de incertidumbre mayor; sin embargo, en el segundo caso se requiere un nivel de confiabilidad superior por el simple hecho de tratarse de un análisis respecto de un solo tipo de fuente de emisión.

Un inventario realizado con una incertidumbre de, por ejemplo, 30% puede resultar muy útil en la identificación de las principales fuentes de emisión; no obstante, esta misma incertidumbre puede ser muy alta si se trata, en cambio, de evaluar el impacto de una medida de control, ya que el resultado de la instrumentación de dicha medida puede producir un cambio de emisión de, por ejemplo, el 5%. Ante esta circunstancia el resultado sería poco confiable dado que el cambio que se desea detectar es más pequeño que la propia incertidumbre de la estimación y, por tanto, no sería claro si la diferencia en emisiones es producto de la medida evaluada o de la incertidumbre. Para poder evaluar cambios pequeños en las emisiones, se requiere que ambos inventarios, tanto el inventario base como el de control, tengan un nivel de incertidumbre menor al 5%.

Para lograr niveles mínimos de incertidumbre en un inventario de emisiones de fuentes móviles para una ciudad o zona urbana es necesario recopilar tanta información confiable como sea posible, a través de mediciones directas en campo u otras estrategias de modelación. Con ello se lograría reducir el uso de datos predeterminados, sobre los cuales se ignora el nivel de representatividad pueden tener de la circunstancia o situación imperante en el lugar para el que se desea generar el inventario de emisiones.

En algunas aplicaciones particulares, los investigadores o personas encargadas de generar el inventario suelen usar modelos de transporte (modelos que son capaces de simular segundo por segundo los movimientos de todas las personas y vehículos a través de la red de transporte en el área metropolitana). Estos modelos de transporte pueden generar los insumos demandados por un modelo de emisiones para los que no se tiene información recopilada en campo. Sin embargo, en algunas ocasiones estos modelos puede ser incluso más complejos en su uso y más demandantes de información que los propios modelos de emisiones, lo que le asocia, de manera natural, una mayor incertidumbre a sus resultados cuando los datos necesarios para su aplicación están incompletos o son de poca calidad. Algunos datos o resultados que este tipo de modelo puede proporcionar son:

- Análisis de tráfico en toda la red de transporte de un área metropolitana, incluyendo las calles residenciales.
- Indicación de la velocidad y aceleración para cada vehículo en cualquier segundo de la jornada.
- Información detallada sobre la ubicación de cada vehículo y un análisis preciso sobre efectos transitorios.

En general, en cuanto más específica es la medida o más pequeño es el cambio esperado por la instrumentación de una medida de control, se requerirá también de una caracterización más detallada, tanto de la flota como de la actividad vehicular. En este caso, la caracterización de la actividad vehicular deberá realizarse preferentemente a través de la recopilación de datos en campo. Esto significa que se tendrá un mejor inventario de emisiones de fuentes móviles con menor incertidumbre.

5.3. Criterios de evaluación cualitativa de un inventario de emisiones vehiculares

A partir de lo descrito anteriormente, resulta evidente que tanto el origen como la calidad de los datos utilizados en una estimación de emisiones de fuentes móviles pueden ser decisivos en la calidad final del inventario. Entonces, este tipo de información resulta un buen indicador de referencia para desarrollar una evaluación cualitativa de la calidad y confiabilidad del inventario de emisiones de fuentes móviles.

Como se ha expuesto al hablar de la incertidumbre asociada a las características del inventario, el rigor y detalle de los insumos demandados por un inventario de emisiones de fuentes móviles varía de acuerdo con su cobertura geográfica. Entonces, el cuadro 5-1 muestra una relación, no exhaustiva, de los principales insumos y el posible origen de los datos necesarios para un inventario a micro, meso y macroescala. Este cuadro muestra un indicador cualitativo representado por estrellas, donde un mayor número de estrellas indica que la información y su fuente son más adecuadas. Así, una sola estrella indica la fuente de información que, aún siendo la menos recomendada dentro de las posibles fuentes referidas, cuenta con una calidad y certidumbre aceptable como para obtener de ella los datos necesarios para usar como insumo en la estimación de un inventario de emisiones. Cinco estrellas indican la fuente de información que se considera más confiable para la obtención de los datos necesarios, según el parámetro buscado, ya sea por su calidad, por su certidumbre, por el detalle con el que está disponible o por todas estas cualidades juntas.

Dado que el enfoque de esta guía se centra en la elaboración de inventarios de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas, es decir inventarios de mesoescala, el Cuadro 5-2 presenta la manera de evaluar cualitativamente la calidad de un inventario de este tipo. A partir del número de estrellas obtenidas en la evaluación del origen y la calidad de la información sobre caracterización de la flota vehicular, la actividad vehicular, los factores de emisión y otras variables, se sugiere “calificar” el inventario de emisiones como de calidad suficiente, buena o muy buena. Cada calificación está asociada, a su vez, con usos recomendados en relación con la calidad del inventario.

Este mecanismo de evaluación es una guía sencilla para identificar la calidad del inventario y es también perfectible, por lo que cualquier sugerencia para mejorarlo será bienvenida, tanto por el INE como por todos los usuarios potenciales de este documento.

Cuadro 5-1. Matriz de evaluación cualitativa de un inventario de emisiones de fuentes móviles

	Parámetro	Posibles herramientas o fuentes de datos	Cobertura Geográfica		
			Macro-escala	Meso-escala	Micro-escala
Caracterización de la flota vehicular	Tamaño total de la población vehicular activa en circulación	<ol style="list-style-type: none"> Datos de registro de vehículos Datos de programas obligatorios de verificación vehicular Datos de venta de vehículos nuevos combinado con encuestas a vehículos en circulación para calcular el parque activo 	★★	★	N/A
	Distribución por año modelo dentro de cada categoría vehicular	<ol style="list-style-type: none"> Medición de vehículos en circulación en base a flujo vehicular por hora del día y del largo de la ruta (kilómetros) combinado con: <ul style="list-style-type: none"> encuestas a vehículos en circulación lectores automáticos de las placas de los vehículos y una base de datos de programas obligatorios de verificación vehicular 	★★★	★★	★
Caracterización de la actividad vehicular	Acumulación anual del kilometraje por clase de vehículo	1. Recorrido anual promedio por vehículo de cada tipo o clase utilizando registros de verificación vehicular	★★★☆☆	★★★	★★
		2. Recorrido anual promedio por vehículo de cada tipo o clase de encuestas a usuarios	Sumar resultados medidos en múltiples ciudades	★★★☆☆	★★★☆☆
		3. Calculado desde la venta de combustibles con datos de rendimiento de los vehículos y conocido el número total de vehículos	★	★	N/A
		4. Utilizando aforadores, muestrear el flujo vehicular en cada clase de vía en la zona de interés y multiplicar el resultado (vehículos/día) por la longitud de las vías (Km..)	★★	★★	N/A
		5. Grabar con video el flujo vehicular en cada clase de vía en la zona de interés y multiplicar el resultado (vehículos/día) por la longitud de las vías (Km..)	★★★★★	★★ (gasolina)	N/A
		6. Utilizando un modelo calibrado de transporte*	Sumar resultados medidos en múltiples ciudades	★★★★★	★★★★★
		7. Utilizar datos de otra ciudad similar	Sumar resultados medidos en múltiples ciudades	★★★★★	★★★★★

	Parámetro	Posibles herramientas o fuentes de datos	Cobertura Geográfica		
			Macro-escala	Meso-escala	Micro-escala
Caracterización de la actividad vehicular	Distribución de kilómetros viajados por tipo de camino	1. Estimación de expertos	★★	★	N/A
		2. Utilizando aforadores, muestrear el flujo vehicular en cada clase de vía en la zona de interés y multiplicar el resultado (vehículos/día) por la longitud de las vías (Km..)	★★★★	★★★	★★★★
		3. Grabar con video el flujo vehicular en cada clase de vía en la zona de interés y multiplicar el resultado (vehículos/día) por la longitud de las vías (Km..)	★★★★★	★★★★★	★★★★★
		4. Utilizando un modelo calibrado de transporte	★★★★★	★★★★★	★★★★★
		5. Utilizar datos de otra ciudad similar	N/A	★★	N/A
	Distribución de velocidad promedio por tipo de camino	1. Estimación de expertos	★★	★	N/A
		2. Determinación de una velocidad típica por tipo de vía utilizando: <ul style="list-style-type: none"> recorridos (técnica de observador móvil) GPS (grabaciones por segundo) Video un modelo de calibrado transporte 	★★ ★★★ ★★★★ ★★★★	★ ★★ ★★ ★★	★ ★ ★ ★
		3. Determinación de la distribución por horas, de la velocidad por tipo de vía utilizando: <ul style="list-style-type: none"> recorridos (técnica de observador móvil) GPS (grabaciones por segundo) Video un modelo de transporte calibrado 	★★★★ ★★★★★ ★★★★★ ★★★★★	★★★★ ★★★★★ ★★★★★ ★★★★★	★★★★ ★★★★★ ★★★★★ ★★★★★
		4. Utilizar datos de otra ciudad similar	N/A	★★	N/A
Calibración del ciclo de manejo	1. Utilizar el ciclo que tiene el modelo de base	★★★	★★★	N/A	
	2. Determinar ciclo específico utilizando GPS para grabar segundo-por-segundo velocidades, aceleración, pendiente del camino	★★★★★	★★★★★	★★★★★	
	3. Utilizar datos de otra ciudad similar	N/A	★★★★	N/A	

	Parámetro	Posibles herramientas o fuentes de datos	Cobertura Geográfica		
			Macro-escala	Meso-escala	Micro-escala
Caracterización de la actividad vehicular	Número de viajes por día y periodos de inactividad entre viajes	1. Utilizar los datos que tiene el modelo de base	★★★★	★★★	★★★
		2. Estimación de expertos	★	★	★
		3. Medir en campo con una muestra amplia de vehículos y usuarios	★	★★★★	★★★★
		4. Utilizando un modelo calibrado de transporte	★★★★★	★★★★★	★★★★★
Uso del aire acondicionado	1. Utilizar los datos que tiene el modelo de base	★★★★★	★★★	★★★	
	2. Estimación de expertos	★★	★★	★	
	3. Medir en campo con una muestra amplia de vehículos y usuarios	★★★	★★★★★	★★★★★	
Factores de emisión	1. Utilizar los datos que tiene el modelo de base (g/Km..)	★★★★	★★★★	★★★★	
	2. Calibrar los datos que tiene el modelo de base a través de mediciones en campo de consumo de combustible	★★★★★	★★★★★	★★★	
	3. Medir las emisiones en campo de: <ul style="list-style-type: none"> • Una muestra limitada de vehículos • Una muestra amplia de vehículos 	★ ★★★★	★ ★★★	★ ★	
Otros	Variables ambientales (Temperatura, Altitud, Humedad relativa)	1. Utilizar los datos que tiene el modelo de base	★	★	★
		2. Estimación de expertos	★	★	★
		3. Recabar datos de la estación meteorológica más cercana	★★★★★	★★★★★	★★★★★
	Características del combustible	1. Utilizar los datos que tiene el modelo de base	★★	★★★★	★★★★
2. Utilizar los límites de las normas nacionales		★★	★★★★★	★★★★	
3. Utilizar datos de pruebas realizadas		★★★★★	★★	★	

***NOTA:** al referirse a un modelo de transporte calibrado se quiere destacar que la información proviene de un modelo que ha sido alimentado con la mejor información disponible y con la menor incertidumbre posible. Por lo que el detalle de información que proporciona este tipo de herramienta se considera una de las de mayor valor analítico

Cuadro 5-2. Matriz de evaluación de un inventario de emisiones de mesoescala

Evaluación (estrellas)	Calidad	Principales características	Usos Potenciales
16 -27	Suficiente	Inventario creado a partir de insumos generales sobre tamaño de flota, actividad vehicular y factores de emisión a los que se les asocia una gran incertidumbre, por lo que se tienen que hacer grandes supuestos para su empleo en el cálculo del inventario.	Inventario que por su calidad puede ser empleado sólo como una primera aproximación o evaluación diagnóstica de las emisiones provenientes de fuentes móviles en un lugar determinado.
28 - 39	Bueno	Inventario creado con datos sobre tamaño de flota, actividad vehicular y factores de emisión provenientes de una mezcla de fuentes, que consideran tanto datos generales (gruesos) como específicos, que han pasado o no por algún proceso de aseguramiento y control de calidad.	Inventario que por su calidad puede ser empleado en la evaluación de los impactos (sentido y magnitud), que en emisiones tienen diferentes medidas de control a través del tiempo en un lugar determinado. Por el grado de incertidumbre de los datos empleados en su elaboración aún puede haber algún riesgo de tomar decisiones equivocadas; sin embargo, este nivel de riesgo es aceptable.
40 - 50	Muy Bueno	Inventario creado a partir de insumos detallados sobre tamaño de flota, actividad vehicular y factores de emisión que han sido obtenidos de fuentes confiables y que han tenido un efectivo y eficiente control y aseguramiento de calidad, por lo que las incertidumbres en el cálculo del inventario son menores.	Inventario que por su calidad puede ser empleado en la evaluación de los impactos (sentido y magnitud), que en emisiones tienen diferentes medidas de control de emisiones a través del tiempo en un lugar determinado. El riesgo de tomar decisiones equivocadas a partir de la información derivada del análisis de este tipo de inventarios es menor.

Nota: Los valores extremos 16 y 50 se obtienen del número mínimo y máximo de estrellas que se puede obtener al evaluar cada uno de los parámetros (segunda columna del Cuadro 5-1), considerados en la evaluación del inventario.

6. REPORTE DE UN INVENTARIO DE EMISIONES DE FUENTES VEHICULARES

El proceso de elaboración de un inventario de emisiones vehiculares no culmina con los cálculos realizados, sino con la elaboración de un reporte final cuya calidad determinará en gran medida su verdadera utilidad y aprovechamiento. El comunicar a las personas interesadas los resultados del inventario con suficiente detalle y claridad es tan valioso como la estimación misma de las emisiones, ya que de ello dependerá el uso adecuado de la información generada. Así, el procedimiento general para la comunicación de resultados de un inventario de emisiones consiste en la publicación y distribución de un reporte final, el cual debe incluir una serie de elementos indispensables a fin de cumplir con el objetivo de comunicar con claridad y detalle los resultados obtenidos. En general, se sugiere que el informe final del inventario incluya, al menos, los siguientes elementos:

- Título
- Agradecimientos
- Índice
- Resumen ejecutivo
- Introducción
- Características del inventario
- Integración del inventario
- Presentación de Resultados
- Análisis de resultados
- Conclusiones y recomendaciones
- Bibliografía
- Apéndices

En las siguientes secciones de este capítulo se describen las características generales de cada una de estos elementos.

6.1. Título

El nombre de un trabajo es la primera impresión que se proporciona al lector; por lo que debe ser lo suficientemente informativo y preciso en lo que se refiere al

contenido. Se recomienda incluir en el título datos que permitan identificar el tipo de inventario de que se trata, el alcance o cobertura del mismo y el año base del inventario para reflejar el periodo al cual se refieren las emisiones reportadas. Por ejemplo: “Inventario de emisiones vehiculares de la ciudad de Puebla, 2004”; éste título refleja que el contenido del reporte incluye la estimación de emisiones que provinieron de fuentes móviles que circularon únicamente por las vialidades de la ciudad de Puebla durante el año 2004.

El título, así como el nombre y logotipo de la institución o instituciones que participan en la elaboración del inventario se incluyen en la portada.

6.2. Agradecimientos

Generalmente, la elaboración de un inventario de emisiones constituye un gran esfuerzo conjunto de diversos actores. Incluso, las autoridades responsables de la elaboración del inventario procuran la ayuda y el apoyo de muchas otras autoridades y entidades públicas, privadas y académicas. Normalmente, en esta sección, los autores reconocen por escrito la participación de todas estas personas, instituciones, organizaciones, universidades o entidades que ayudaron o contribuyeron de alguna manera. Así mismo, se reconoce a quienes apoyaron con información o con recursos económicos a la elaboración del propio inventario; de manera que la mención de todos ellos se considera una cortesía.

Schemelkes (1988), sugiere que en primer lugar se debe citar a los individuos que específicamente han colaborado en el desarrollo de la una investigación (en este caso en la elaboración del inventario), en segunda instancia a las instituciones que permitieron el desarrollo del trabajo y, finalmente, a las fuentes de ayuda financiera.

6.3. Índice

En cualquier documento impreso el índice se considera esencial; porque hace posible que el lector localice la parte que le interesa consultar de manera inmediata. Por ello, debe ser lo más completo posible e incluir todos los encabezados del documento.

También, se sugiere incluir también un índice para los cuadros y figuras empleadas en el informe final. Para el lector es más claro contar con un índice especial para el resto del informe, otro para los cuadros y otro para las gráficas o figuras.

6.4. Resumen ejecutivo

El resumen ejecutivo consiste en una síntesis de todo el documento y se elabora con la finalidad de brindar información sintética que sirva al lector para identificar los principales componentes y resultados del inventario.

Dentro de este apartado se debe incluir una breve descripción de los objetivos, características del inventario (cobertura espacial y temporal), metodología empleada en la estimación de las emisiones (sin entrar en mayores detalles), los resultados más importantes y las conclusiones más generales.

Muchos usuarios, incluyendo los tomadores de decisiones, acuden de entrada al resumen ejecutivo para tener una primera visión rápida del contenido. De la calidad del resumen depende, entonces, que el usuario emprenda una lectura exhaustiva del resto del documento. Por ello, es indispensable invertir tiempo y creatividad en esta sección, para asegurar el impacto deseado en el lector y propiciar el uso adecuado de todo el contenido del informe.

6.5. Introducción

La introducción ofrece un panorama general del trabajo realizado para la generación del inventario y el contexto del mismo. Como parte esencial de su contenido, se deben desarrollar los siguientes puntos:

- Situación actual sobre la calidad del aire, así como de la existencia de estudios sobre emisiones vehiculares y mediciones de concentración de contaminantes en la zona de cobertura. Es conveniente comenzar con un panorama general que defina el avance en el conocimiento que se tiene sobre este tipo de emisiones, haciendo referencia también a la existencia previa de otros inventarios de emisiones, así como programas para mejorar la calidad del aire.

- Justificación y objetivos de la elaboración del inventario. En esta etapa se recomienda mencionar, a manera de antecedente, el origen legal, administrativo o de investigación que avale la responsabilidad de la entidad que elabora el inventario; es decir, el fundamento en el cual se basa la elaboración del inventario, haciendo referencia a las leyes aplicables y otros documentos relativos. Así mismo, es oportuno incluir los argumentos que justifican la elaboración de dicho inventario y los objetivos que se pretenden alcanzar con la generación del mismo.

- Estructura del informe. Finalmente, la introducción debe concluir con un repaso general del contenido del informe. Esta etapa debe incluir una breve descripción de la forma en que está integrado el reporte del inventario, acompañada de una breve mención del contenido de cada uno de los capítulos que integran el reporte.

6.6. Características del inventario

Esta sección es de suma importancia ya que es la que establece las principales características y circunstancias del propio inventario de emisiones vehiculares. De manera general, existen cuatro características que definen el contenido de un inventario y a continuación se expone cada una de ellas.

- Cobertura geográfica y resolución espacial. Esta característica se refiere propiamente al territorio que abarca la zona de estudio; por ejemplo, en el título mencionado anteriormente como “Inventario de emisiones vehiculares de la ciudad de Puebla, 2004”, la cobertura geográfica del inventario es, precisamente, la ciudad de Puebla. En esta sección conviene, además de citar la zona de referencia, proporcionar algunos datos adicionales sobre la situación de la región, tales como sus fronteras, división política, así como su situación geográfica y económica, entre otros. Así, se puede definir posteriormente la resolución espacial, que nos indica el nivel de detalle con el que son estimadas las emisiones y se dan a conocer a los usuarios, esto puede ser, por ejemplo, a nivel municipal.

- Año base y resolución temporal. El año base se refiere a la fecha en que fueron emitidas las emisiones estimadas; por lo que al referirnos a un año base

automáticamente estamos asumiendo que la resolución temporal del inventario es anual, es decir, comprende las emisiones de todo un año. Sin embargo, el inventario también puede estar determinado por una resolución temporal que puede ser mensual, estacional, etc. En este apartado es oportuno proporcionar también una breve explicación del motivo por el cual se ha decidido tomar cierto año base o resolución temporal, que puede estar afectado por hechos como la disponibilidad de información o algún interés específico, entre otros.

- Contaminantes considerados. Esta característica del inventario es básica pues, aunque existen ciertos contaminantes que típicamente son emitidos por vehículos y siempre reportados de la misma manera, como el monóxido de carbono (CO), existen otros contaminantes que pueden reportarse de distintas formas. Por ejemplo, los hidrocarburos pueden reportarse como compuestos orgánicos totales (COT), gases orgánicos totales (GOT), hidrocarburos (HC) o bien como compuestos orgánicos volátiles (COV), por lo que en el inventario debe quedar documentado qué formato se elige y por qué.
- Categorías de fuentes emisoras. En este caso también es muy importante definir cuáles son las categorías vehiculares que se consideran en el inventario, ya que la forma de clasificar los diferentes tipos de vehículos puede variar. Uno de los principales elementos que hace variar la forma de clasificar los vehículos en categorías es el tipo de modelo de emisiones que se utiliza pues, como ya se ha visto a lo largo de este documento, cada modelo para estimar las emisiones determina el detalle con el cual se clasifican los diferentes tipos de vehículos que se consideran en el inventario. Así mismo, las categorías vehiculares consideradas en el inventario pueden incluir otro tipo de vehículos como motocicletas, microbuses, etc., que pueden ser muy específicos y tal vez no estar presentes en la flota local o bien utilizar otro tipo de combustible no considerado en el inventario, de lo cual hay que dar cuenta y justificar en esta sección.

6.7. Integración del inventario y actualización

En este apartado se explican con detalle los métodos y procedimientos utilizados, de forma tal que exista una clara comprensión de lo realizado. Se describe el proceso de recopilación y procesamiento de información, procedimientos de control y

aseguramiento de calidad de la información y el proceso de planeación e integración del inventario. En general, se recomienda que en esta sección del informe se aborden, al menos, los siguientes puntos.

6.7.1. Panorama general del proceso de desarrollo del inventario

En esta sección se describe de manera clara y detallada del proceso que se ha seguido para la integración del inventario, considerando todas sus etapas, tanto de planeación como de ejecución. Así mismo, se debe dar cuenta también del proceso que se estima necesario seguir para la actualización del inventario. Se deberá abordar el tema de la periodicidad con la que será actualizado el inventario, las fechas en que se estima se vayan generando estas actualizaciones; así como considerar los aspectos técnicos, administrativos, de acceso a la información, de regulación vigente e incluso de recursos económicos requeridos para la realización de dichas actualizaciones.

6.7.2. Recopilación de datos

Aquí se describe tanto la fuente de información de los datos como la forma en que fueron recopilados y procesados los datos clave utilizados en los cálculos de las emisiones vehiculares. Se incluye también información referente a la incertidumbre que pueda acarrear la fuente de información y cada una de las etapas de recopilación y manejo de los datos. Para este propósito se sugiere abordar la descripción de los datos a partir de la siguiente clasificación jerárquica de los mismos:

Datos primarios.- Son los datos mínimos requeridos para generar un inventario de emisiones básico, por ejemplo, KRV, consumo de combustible, estándares de emisión vehicular por año y modelo, velocidades vehiculares promedio, factores de emisión por tipo de vehículo, tipo de combustible, año, modelo y velocidad de manejo, datos de la calidad del combustible para la región del inventario incluyendo contenido de azufre, oxígeno, plomo y presión de vapor Reid (PVR), distribución del parque vehicular por año y modelo, incluyendo la fracción de vehículos no registrados y extranjeros, condiciones locales de altitud y temperatura ambiente, tasas de acumulación anual de kilómetros recorridos por vehículo, por clase vehicular, modelo y año.

Datos secundarios.- Reemplazan a los parámetros clave por omisión con datos locales, por ejemplo, información sobre el programa local de inspección y

mantenimiento de vehículos (I/M), y datos de las encuestas locales de alteración de vehículos y tasas de uso del combustible no adecuado.

Datos terciarios.- Se incluyen en la medida en que estén disponibles para refinar el inventario con respecto a las condiciones locales. Por ejemplo datos de las encuestas locales de hábitos de manejo para identificar las longitudes de recorrido promedio y el tiempo transcurrido entre los arranques de motor, datos de la encuesta del patrón de manejo para identificar los patrones locales de velocidades vehiculares, peso transportado y tasas de aceleración.

6.7.3. Metodología

Esta sección describe diversos aspectos relacionados con el o los modelos utilizados para estimar las emisiones de los vehículos automotores, incluyendo una breve descripción teórica de los algoritmos utilizados. También se describen y analizan los archivos tanto de entrada como de salida utilizados y generados por el modelo, así como los supuestos o consideraciones específicas utilizadas para su aplicación poniendo especial énfasis en aquellas que pudieran tener una influencia significativa en los resultados obtenidos

6.7.4. Aseguramiento de calidad

Un paso clave en el desarrollo de inventarios de emisiones útiles consiste en evaluar la precisión general de las estimaciones. Esta sección debe describir los procedimientos de aseguramiento de calidad (AC) que se aplicaron para verificar la racionalidad y precisión de la estimación de las emisiones de los vehículos automotores.

Los procedimientos específicos que suelen ser utilizados para evaluar la precisión de las estimaciones de las emisiones de los vehículos automotores, y que deben ser descritos en esta sección, incluyen las siguientes comparaciones:

- Las emisiones de vehículos automotores contra las emisiones generales del inventario
- Las emisiones *per cápita* de la zona contra las de otra zona o región
- Las emisiones contra KRV

- Los datos de actividad vehicular contra las estadísticas de consumo de combustible
 - Los resultados de estudios de detección remota de las emisiones del escape
- Debe documentar cómo y dónde están salvaguardados los archivos de cálculo y datos utilizados para el inventario y cómo se podrá obtenerlos para cálculos posteriores.

Así mismo, el inventario debe ser revisado por terceros calificados independientes (*peer reviewed*) y sus comentarios y recomendaciones deben estar incorporados en el contenido y mencionados en esta sección.

6.8. Presentación de resultados

Esta parte del informe final se debe redactar con la mayor claridad posible, debido a que en ella se coloca cualquier resultado que se haya obtenido durante la elaboración del inventario de emisiones. Existen diversas formas de presentar los resultados de la estimación de emisiones y es conveniente que el reporte de cuenta de varias de ellas con la finalidad de presentar toda la información generada de manera estructurada y clara. Así, tenemos que las emisiones se pueden reportar por tipo de vehículo, por contaminante y con diferente resolución, ya sea estatal, regional, municipal, etc.

La presentación de resultados suele apoyarse en el uso de gráficas, cuadros o figuras. Estas herramientas son útiles al momento de comunicar los resultados de manera efectiva a los lectores. Los cuadros son ayudas visuales que organizan los resultados y los comunican al lector. Se recomienda su uso cuando se desea indicar una relación que es difícil de explicar por escrito o cuando se quiera facilitar la presentación de la información. El cuadro debe ser independiente del texto, sin embargo, es necesario mencionarlo en él. Las figuras son vehículos mediante los cuales se presentan ideas, o hechos valiéndose de símbolos pictóricos. En general, todos los cuadros y figuras deben poseer un título claro y conciso que indique su contenido y estar listadas en un índice.

6.9. Análisis de resultados

El análisis de los resultados consiste en la interpretación de los datos reportados como resultados finales de un inventario de emisiones de fuentes vehiculares. El objetivo de este apartado es determinar la importancia de los resultados y cuán significativos son en un contexto específico. De manera muy particular en esta sección se trata de

encontrar respuestas, entre otras, a preguntas tales como: ¿Qué significan los resultados?, ¿Cómo surgieron los resultados?, ¿Cuáles son las posibles explicaciones de los resultados?, ¿Cuál es la incertidumbre asociada a los resultados?, ¿Qué utilidad tienen los resultados?, etc. a fin de poder emitir conclusiones finales, conformadas por la explicación de resultados, y de comparar los resultados mismos del inventario con resultados de otros inventarios similares. Entonces, se recomienda presentar los resultados en términos de la contribución de las diversas clases de fuentes móviles, por contaminante, dar referencias y puntos de partida (especificar cuántas toneladas es mucho o poco, etc.)

6.10. Conclusiones y recomendaciones

En esta sección se hace una breve recapitulación de los principales hallazgos asociados al análisis de los resultados generados por un inventario de emisiones de fuentes vehiculares, lo que le da al lector una visión de conjunto de los resultados obtenidos. La idea principal es proponer una interpretación concisa de los resultados a fin de ponerlos en contexto respecto la metodología y datos usados para su generación. Ello permite, entre otras cosas:

- Definir los alcances y utilidad de la información generada
- Comparar los resultados del inventario con resultados obtenidos en inventarios similares
- Establecer la aplicación probable de la información generada, etc.

Las recomendaciones, por otra parte, son los elementos metodológicos y de información que han surgido durante el desarrollo del inventario y que se muestran de primera instancia como puntos débiles y que en esta sección se presentan como áreas de oportunidad que pueden permitir una mejora significativa en futuras actualizaciones del inventario.

6.11. Bibliografía

Es importante que en esta sección se reporten todas y cada una de las fuentes de información consultadas para obtener y procesar toda la información usada en la estimación de las emisiones vehiculares y en general de todas aquellas fuentes consultadas para formar el contenido del reporte. En este sentido, se sugiere incluir las

referencias sobre documentos preparados por otras instituciones, páginas electrónicas, libros, revistas, documentos oficiales, etc.

6.12. Apéndices

Los anexos o apéndices incluyen material relevante respecto de la estimación de emisiones y sirven para darle mayor claridad y profundidad al reporte final. Todo anexo debe estar mencionado en el texto del informe final y debe aparecer en el orden en que ha sido mencionado en el cuerpo del trabajo. Entre los documentos que pueden incluirse como anexo se pueden citar los siguientes:

- Memorias de cálculo
- Bases de datos usadas como insumos al modelo empleado en la estimación de las emisiones de fuentes vehiculares (por ejemplo, factores de emisión, datos desagregados de flota y actividad vehicular, características del combustible, variables ambientales, etc.)
- Bases de datos completas sobre resultados detallados generados por el modelo (emisiones desagregadas por arranque, en marcha, por hora, por contaminantes, por época del año, etc.)
- Encuestas o cuestionarios aplicados para recopilar información
- Mapas de redes viales usados como referencia para recopilación de información,
- Descripción técnica detallada de los principios de funcionamiento de los modelos de emisiones empleados; etc.

Además de estos reportes generales que tienen un nivel medio de detalle, puede considerarse la opción de contar con otros instrumentos, tanto más detallados como menos detallados. Alguno de estos documentos pueden ser muy técnicos, tales como memorias de cálculo más detalladas que se conservan con el propósito de utilizarlos y revisarlos en las posteriores actualizaciones del inventario. Otros pueden ser concebidos con fines de distribución general para informar a la población general únicamente sobre los resultados más relevantes, este puede ser el caso de folletos, trípticos, pósters, etc.

7. GLOSARIO

Aceleración: magnitud física que mide la tasa de variación de la velocidad respecto al tiempo. Las unidades que expresa la aceleración serán unidades de velocidad divididas por las unidades de tiempo: longitud/tiempo² (en unidades del sistema internacional se usa generalmente [m/s²]).

Asma: es una enfermedad inflamatoria del aparato respiratorio que provoca dificultad en la respiración (disnea).

Carburador: es el dispositivo que hace la mezcla de aire-combustible en los motores a gasolina.

Ciclo de manejo: es un perfil de velocidades trazado en un plano velocidad-tiempo, que representa una forma de conducir en una ciudad o autopista, tomando en cuenta la tecnología del vehículo, las características del tráfico, de las carreteras, características climáticas y geográficas y también características de los mismos conductores.

Ciclo de manejo LA4: La prueba FTP 75 es empleada en los Estados Unidos para la certificación de las emisiones de vehículos livianos, empleando el ciclo de prueba conocido como LA4, que simula una ruta urbana con rangos de velocidad que oscilan entre 0 y 91.2 Km./hr y una duración de 2,475 segundos (41 minutos con 15 segundos) y 17.77 Km. recorridos durante los cuales se pueden distinguir cuatro diferentes etapas: una de arranque en frío (después de mantener el motor apagado por un mínimo de 12 horas), otra de circulación a temperatura estabilizada, otra con el motor apagado, y la última de arranque en caliente (después de enfriar durante sólo diez minutos). Durante cada una de las etapas de circulación, hay períodos en los que el vehículo se está acelerando, otros en los que se va a velocidad constante, otros frenando y otros en los que permanece en neutro (simulando los altos en los semáforos).

Cilindrada: denominación que se da a la suma del volumen útil de todos los cilindros de un motor alternativo. En otras palabras cilindrada es el volumen geométrico ocupado por el conjunto de pistones desde el punto muerto inferior (PMI) hasta el

punto muerto superior (PMS). La cilindrada da una buena medida de la capacidad de trabajo que puede desarrollar un motor.

Convertidor catalítico: este término designa genéricamente a un reactor instalado luego del múltiple de escape. Tiene una cubierta de acero inoxidable que contiene en su interior al catalizador, que es una sustancia químicamente activa, soportada por un elemento tipo panal de material cerámico o metálico, recubierto por una capa amortiguadora que lo protege de golpes. Es usado para el control de la emisión de los gases de combustión.

Convertidor catalítico de dos vías: convertidores catalíticos diseñados específicamente para llevar a cabo reacciones químicas de oxidación que disminuyen los niveles de emisión de monóxido de carbono e hidrocarburos.

Convertidor catalítico de tres vías: convertidores catalíticos diseñados para a cabo reacciones químicas de oxidación y reducción que disminuyen los niveles de emisión de monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno.

Edema pulmonar: es una acumulación anormal de líquido en los pulmones, en especial los espacios entre los capilares sanguíneos y el alveolo, que lleva a que se presente hinchazón.

Emisiones antropogénicas: emisiones generadas por la actividad humana

Emulsión: una emulsión es una mezcla estable (si se le agrega un emulsionante) y homogénea de dos líquidos que normalmente no pueden mezclarse. La mayor parte de las emulsiones constan de un líquido polar, como el agua; y otro apolar, como el aceite y la mayoría de los disolventes orgánicos. Por este motivo tradicionalmente se denominan *agua* y *aceite* a los dos componentes de la emulsión. Cuando la emulsión es estable, uno de los líquidos se encuentra formando pequeñas gotas en el interior del otro

Estrés del motor: es un parámetro que correlaciona los requerimientos de potencia del vehículo, para vencer la resistencia al desplazamiento, con las revoluciones por minuto (RPM) del motor. Así, un bajo estrés del motor refiere una condición en la cual el vehículo opera a baja velocidad, baja aceleración y bajas RPM del motor. Por el contrario, un estrés de motor alto indica una velocidad alta, una aceleración alta y altas

RPM del motor. El uso prolongado de velocidades altas puede causar desgaste excesivo del motor y otros daños.

Exposición aguda: la exposición se define como la interacción entre un agente tóxico y un sistema biológico y se le considera aguda cuando dicha exposición ocurre por periodos cortos de tiempo (por ejemplo, días u horas).

Inyección electrónica: es un sistema que reemplaza al carburador en los motores a gasolina para dosificar el combustible y crear una mezcla aire / combustible, muy próxima a la estequiométrica (14,7:1 para la gasolina), lo que garantiza una muy buena combustión con reducción de los porcentajes de gases tóxicos emitidos a la atmósfera. La relación estequiométrica es la proporción exacta de aire y combustible que garantiza una combustión completa de todo el combustible. Se basa en la ayuda de la electrónica para dosificar la inyección del carburante.

Inyección electrónica central o monopunto: sistema de inyección electrónica de combustible en el que se hace uso de sólo un inyector para todos los cilindros.

Inyección electrónica múltiple o multipunto: sistema de inyección electrónica de combustible en el que se hace uso de un inyector por cada cilindro.

Monitoreo a bordo: método de medición directa de las emisiones vehiculares, en el que a partir de un sistema de medición portátil se miden las emisiones bajo condiciones de operación reales de los vehículos.

Motor de combustión interna es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por un combustible que arde dentro de una cámara de combustión.

Motor de combustión interna avanzada (motores a diesel): motor de combustión interna con alta eficiencia térmica (mayor a la convencional, la cual nominalmente es de entre 20 y 25%) y bajas emisiones contaminantes. Los principios de combustión de estos motores son el encendido espontáneo homogéneo de la carga (HCCI por sus siglas en inglés) y la combustión a baja temperatura (LCT por sus siglas en inglés).

Motor de combustión interna convencional (motores a gasolina): motor de combustión interna cuyo funcionamiento se basa en el ciclo termodinámico conocido como ciclo Otto, el cual se caracteriza porque todo el calor se aporta a volumen

constante. Hay dos tipos de motores que se rigen por el ciclo de Otto, los motores de dos tiempos y los motores de cuatro tiempos. La eficiencia media de un motor Otto es de un 20 a un 25%: sólo la cuarta parte de la energía calorífica se transforma en energía mecánica.

Motor de cuatro tiempos: es un motor de combustión interna que precisa de cuatro carreras del pistón o émbolo (dos vueltas del cigüeñal), para completar el ciclo termodinámico (admisión, compresión, expansión y escape).

Motor de dos tiempos: también denominado motor de dos ciclos, es un motor de combustión interna que realiza las cuatro etapas del ciclo termodinámico (admisión, compresión, expansión y escape) en dos movimientos lineales del pistón (una vuelta del cigüeñal).

Pendiente del camino (*Road grade*): es definida como una medida de la inclinación o cuesta del camino a lo largo de su ruta. Varios trabajos indican que esta variable tiene un impacto significativo en el desempeño y en las emisiones de un vehículo.

Peso Bruto Vehicular (PBV): es el peso del vehículo cuando transporta la carga máxima permitida por el fabricante con el tanque de combustible lleno.

Peso de Prueba (PP): es el peso total de carga recomendado para un vehículo.

Peso de Prueba Alternativo (PPA): es el promedio del peso del vehículo y el peso bruto vehicular.

Potencia Específica del Vehículo (VSP): se define como la energía requerida por unidad de masa para superar la pendiente del camino, la resistencia aerodinámica y al rodamiento, y la aceleración inercial.

Presión de vapor: características de los compuestos químicos con tendencia a volatilizarse que en fase de vapor ejerce presión sobre el medio que lo rodea.

Prueba dinamométrica: procedimiento de prueba usado para medir las emisiones contaminantes de los vehículos automotores por unidad de distancia recorrida. Estas pruebas son realizadas sobre dinamómetros donde se aplican cargas y velocidades a los vehículos automotores.

Reactividad fotoquímica o fotoreactividad: característica de algunos contaminantes del aire que experimentan o sufren cambios en su composición al reaccionar entre si o con otros constituyentes del aire en presencia de luz solar

Tonelada inglesa (ó tonelada larga): unidad de masa que era muy utilizada en el Reino Unido, que equivale a 1016.05 kilogramos.

Tonelada métrica (también llamada tonelada): es una unidad de masa que en el sistema métrico decimal y actualmente en el Sistema Internacional de Medidas, equivale a 1000 kilogramos

Toxicidad: capacidad inherente de una sustancia para causar daño a un organismo. Para definir la toxicidad en términos cuantitativos se requiere conocer la cantidad de sustancia administrada o absorbida (la dosis), la vía por la cual ingresa la sustancia (inhalación, ingestión, etc.), la distribución y frecuencia en el tiempo de la administración (dosis única o repetida), el tipo y gravedad del daño y el tiempo necesario para causarlo.

Válvula de ventilación positiva (PCV): La ventilación positiva del cárter es un sistema que fue desarrollado para remover vapores dañinos del motor y prevenir que esos vapores sean expelidos a la atmósfera. El sistema PCV lleva a cabo esto mediante un cabezal de vacío para retirar los vapores del cárter hacia el múltiple de admisión. De ahí los vapores son llevados junto con la mezcla aire-combustible a la cámara de combustión en donde son quemados. El flujo o circulación dentro del sistema está controlado por la válvula PCV. La válvula PCV es efectiva como un sistema de ventilación del cárter y como un mecanismo de control de contaminación.

Velocidad: se define como la distancia recorrida dividida entre el intervalo de tiempo. La magnitud de la velocidad se denomina celeridad, y puede medirse en unidades como kilómetros por hora, metros por segundo, etc.

Vía arterial: son vialidades o calles que conectan diferentes secciones de un área urbana. Pueden conectar una sección de un área urbana con otra o pueden proporcionar una conexión importante dentro de una sección del área urbana.

Vía primaria: este tipo de vialidad se caracteriza por permitir la conexión entre áreas urbanas, así como por las altas velocidades de viaje en condiciones de flujo libre y por el reducido número de paradas.

Vía residencial: son aquellas calles que llevan a gente a sus hogares o bien calles que se ubican en las secciones comerciales pequeñas de un área urbana. Se caracterizan por una velocidad media de circulación relativamente baja y por la presencia de intersecciones frecuentes.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Borja-Aburto, V.H., M. Castillejos, D.R. Gold, S. Bierzwinski y D. Loomis. 1998. Mortality and ambient fine particles in southwest Mexico City, 1993-1995. *Environmental Health Perspectives* 106(12): 849-856.

Castillejos, M., D.R. Gold, D.W. Dockery D, T. Tosteson, T. Baum, F.E. Speizer. 1992. Effects of ambient ozone on respiratory function and symptoms in Mexico City schoolchildren. *American Review Respiratory Disease* 145: 276-282.

Castillejos, M., V.H. Borja-Aburto, D.W. Dockery, D.R. Gold y D. Loomis. 2000. Airborne coarse particles and mortality. *Inhalation Toxicology* 12: 61-72.

Davis, N., J. Lents, N. Nikkila y M. Osses. 2004. "Mexico City Vehicle Activity Study". Final Report. 41 pp. Disponible en:

http://www.ine.gob.mx/dgicurg/calair/act_vehicular.html

EPA (Environmental Protection Agency). 2001a. *MOBILE6 Estimates of Exhaust Emissions for 1994-and-later Light Duty Diesel Cars and Trucks*. M6.EXH.011, EPA420-R-01-041 July.

----- 2001b. *Determination of Start Emissions as a function of Mileage and Soak Time for 1981-1993 Model Year Light Duty Vehicles*. M6.STE.003, EPA420-R-01-058 November.

----- 2001c. *Soak Length Activity Factors for Start Emissions*. M6.FLT.003, April EPA420-R-01-011

----- 2001d. *Final Determination of Hot Running Emissions from FTP Bag Emissions*. M6.STE.002 EPA420-R-01-059 November

----- 2001e. *Basic Exhaust Emission Rates of Open Loop Vehicles for MOBILE6: Exhaust Emissions at High and Low Altitudes for Engine Starts and Running Emissions for Motorcycles, Light-Duty Diesel Vehicles and Trucks and Pre-1981 Model Year Light-Duty Gasoline Vehicles and Trucks*. M6. EXH.005 EPA420-R-01-027 April

EPA (Environmental Protection Agency). 2002a. *Determination of Running Emission as a Function of Mileage for 1981-1993 Model Year Light Duty Cars and Trucks*. M6.EXH.001, EPA420-R-02-002 January.

----- 2002b. *Determination of NOx and HC Basic Emission Rates, OBD and I/M Effects for Tier1 and later LDVs and LDTs*. M6.EXH.007, EPA420-R-01-056 November

EPA (Environmental Protection Agency). 2003. *User's guide to MOBILE6.1 and MOBILE6.2. Mobile Source Emission Factor Model*. EPA420-R-03-010. August 2003

EPA (Environmental Protection Agency). 2005. *A Roadmap to MOVES2004*. EPA Report EPA420-S-05-002. March 2005

Fu, L., Hao, J., He, D., He, K. Assessment of vehicular pollution in China. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51(5), pp. 658-668, 2001.

GEBC (Gobierno del Estado de Baja California), Gobierno Municipal de Tijuana, SEMARNAT y SSA. 2000. *Programa para mejorar la calidad del aire de Tijuana-Rosaritoi, 2000-2005*. México. 244 pp.

----- 1999. *Programa para mejorar la calidad del aire de Mexicali, 2000-2005*. México. 243 pp.

GECH (Gobierno del Estado de Chihuahua), Gobierno Municipal de Cd. Juárez y SEMARNAT. 2006. *Programa de gestión de la calidad del aire de Ciudad Juárez, 2006-2012* México. 81 pp.

GEG (Gobierno del Estado de Guanajuato), Gobierno Municipal de Salamanca, SEMARNAP y SENER e Instituto de Ecología de Guanajuato. 2004. *Programa para mejorar la calidad del aire en Salamanca, 2003-2006*, México. 166 pp.

GEJ (Gobierno del Estado de Jalisco), SEMARNAP y SSA. 1997. *Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana de Guadalajara 1997-2001*, México. 176 pp. Disponible en <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/new.consultaListaPub.php>

GEM (Gobierno del Estado de México) y SEMARNAP. 1997. *Aire limpio: programa para el valle de Toluca, 1997-2000*. México. 172 pp. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/new.consultaListaPub.php>

GENL (Gobierno del Estado de Nuevo León), SEMARNAP y SSA. 1997. *Programa de administración de la calidad del aire del Área Metropolitana de Monterrey, 1997-2000*. México. 172 pp. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/new.consultaListaPub.php>

Giannelli, R.A., J.H. Gilmore, L. Landman, S. Srivastava, M. Beardsley, D. Brzezinski, G. Dolce, J. Koupal, J. Pedelty, G. Shyu. 2002. *Sensitivity Analysis of MOBILE6.0*. Assessment and Standards Division, Office of Transportation and Air Quality, U.S. Environmental Protection Agency. EPA420-R-02-035, December 2002

Gold, D.R., A.I. Damokosh, C.A. Pope III, D.W. Dockery, W.F. McDonnel, P. Serrano, A. Retama, M. Castillejos. 1999. Particulate and ozone pollutant effects on the respiratory function of children in southwest Mexico City. *Epidemiology* 10: 8-16.

Hernández-Cadena, L., M.M. Tellez-Rojo, L.H. Sanin-Aguirre, M. Lacasana-Navarro, A. Campos, I. Romieu. 2000. Relationship between emergency consultations for respiratory diseases and air pollution in Juarez City, Chihuahua. *Salud Pública de México*, 42(4):288-97.

Holguin F., M.M. Tellez-Rojo, M. Hernández, M. Cortez, J.C. Chow, J.G. Watson, D. Mannino, I. Romieu. 2003. Air pollution and heart rate variability among the elderly in Mexico City. *Epidemiology*, 14 (5):521-7.

INE-CTS. 2006a. Taller sobre emisiones vehiculares en México. México, D.F. Reporte interno. Disponible en: http://www.ine.gob.mx/dgicurg/calair/download/memorias_final_taller.pdf

----- 2006b. Estudio sobre información y herramientas para la estimación de emisiones de fuentes móviles. México, D. F. Reporte Interno. Disponible en: http://www.ine.gob.mx/dgicurg/calair/download/diag_nal_final.pdf

INE- SEMARNAT, (2005). Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones. México, D.F. 506 pp. Disponible en:

<http://www.ine.gob.mx/publicaciones/new.consultaListaPub.php>

----- 2006. Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999. México, D. F. 377 pp.

Disponible en:

<http://www.ine.gob.mx/publicaciones>

ISSRC (2005). Measurement of In-Use passenger vehicle emissions in three urban areas of developing nations. Disponible en:

http://www.ine.gob.mx/dqicurg/calair/act_vehicular.html

Koupal, J. MOVES: Status and Overview. U.S. EPA Office of Transportation and Air Quality, FACA Modeling Workgroup Meeting. August 8, 2006.

<http://www.epa.gov/otaq/ngm.htm>.

Loomis D., M. Castillejos, D.R. Gold, W. McDonnell, V.H. Borja-Aburto. 1999. Air pollution and infant mortality in Mexico City. *Epidemiology* 10: 118-123.

Mage, D., Ozolins, G., Peterson, P., Webster, A., Orthofer, R., Vandeweerd, V., Gwynne, M. Urban air pollution in megacities of the world. *Atmospheric Environment*, 30(5), pp. 681-686, 1996.

NARSTO – North American Research Strategy for Tropospheric Ozone - .2005. Improving emission inventories for effective air quality management across North America. Preparado por el equipo de evaluación de inventarios de emisiones de NARSTO. 310 pp.

Nicole Davis, James Lents, Nick Nikkita, Mauricio Osses, 2004. *Mexico city vehicle activity study*.

O'Neill, M., D. Loomis y V.H. Borja-Aburto. 2004. Ozone, area social conditions, and mortality in Mexico City. *Environmental Research*, 24, 234-242.

Pierce, T.W., B.K. Lamb, and A.R. Van Meter, 1990. *Development of a Biogenic Emissions Inventory System for Regional Scale Air Pollution Models*. Paper 90094.3. Presented at the 83rd Annual Meeting of the Air and Waste Management Association. Pittsburgh, Pennsylvania, June 24-29.

Plaut, P. O. The comparison and ranking of policies for abating mobile-source emissions. *Transportation Research*, 4D(3), PP. 193-205, 1998

Radian International, 1997. *Manuales del Programa de Inventario de Emisiones de México*. Sacramento, CA 95827.

Robinson, E., y R.C. Robbins, 1968. *Sources, Abundance, and Fate of Gaseous Atmospheric Pollutants*. Report SRI Project PR6755, Stanford Research Institute, Menlo Park, California.

Romano, S.P. 2000. Sintomatología respiratoria asociada a partículas menores de 10 µg (PM10) en el centro de la Ciudad de México. Instituto Nacional de Salud Pública, Cuernavaca Morelos, México.

Romieu, I., M. Cortez-Lugo, S. Ruiz-Velasco, S. Sanchez, F. Meneses, M. Hernandez. 1992. Air pollution and school absenteeism among children in Mexico City. *American Journal of Epidemiology* 136: 1524-1531.

Romieu, I., F. Meneses, J.J.L. Sienna-Monge, J. Huerta, S.R. Velasco, M.C. White, R.A. Etzel, M. Hernández-Ávila. 1995. Effects of urban air pollutants on emergency visits for childhood asthma in Mexico City. *American Journal of Epidemiology* 141: 546-553.

Rosas, I., H.A. McCartney, R.W. Payne, C. Calderon, J. Lacey, R. Chapela, S. Ruiz-Velasco. 1998. Analysis of the relationships between environmental factors (aeroallergens, air pollution, and weather) and asthma emergency room visits to a hospital in Mexico City. *Allergy* 53: 394-401.

Sánchez Constanza. 1999. Evaluación de índices de exposición en el estudio de efectos a la salud por contaminantes atmosféricos del sistema de vigilancia epidemiológica ambiental en la zona metropolitana de la Ciudad de México. En *Conserva Reporte de estudios financiados, Capitulo 2: Salud*. Centro Nacional de Salud Ambiental.

Schemelkes, C. 1998. Manual para la presentación de anteproyectos e informes de investigación (tesis). 1ª edición, México, Editorial Harla.

SMA-GDF (Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal). 2004. Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2004.

SMRN-Puebla. 2006. Programa de gestión de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla, Puebla. México.

Tellez-Rojo, M.M., I. Romieu, M. Polo-Peña, S. Ruiz-Velazco, F. Meneses-González, M. Hernández-Ávila. 1997. Efecto de la contaminación ambiental sobre las consultas por infecciones respiratorias en niños de la Ciudad de México. *Salud Pública de México* 39: 513-522.

Tellez-Rojo, M.M., I. Romieu, S. Ruiz-Velasco, M.A. Lezana, M.M. Hernandez-Avila. 2000. Daily respiratory mortality and PM10 pollution in Mexico City: importance of considering place of death. *European Respiratory Journal*, 16(3):391-6.

Torres-Meza, V. 2000. Acute morbidity at primary care settings and air pollution in Mexico City. Master in Sciences, National Institute of Public Health. Cuernavaca, Morelos, México.