



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA. UZ
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES
CRITERIO Y DE GASES DE EFECTO INVERNADERO,
GENERADAS POR LA ACTIVIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN DE
VIALIDADES EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE
MÉXICO.”**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA
EN INGENIERÍA CIVIL

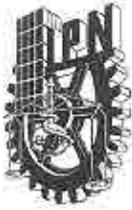
P R E S E N T A:

PATRICIA CAMACHO RODRÍGUEZ

MÉXICO, DISTRITO FEDERAL

Octubre de 2010





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D.F. siendo las 18:00 horas del día 09 del mes de septiembre del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A.-U.Z. para examinar la tesis de grado titulada:

"Evaluación de las emisiones de contaminantes criterio y de gases de efecto invernadero, generadas por la actividad de la construcción de las vialidades en la zona Metropolitana del Valle de México"

Presentada por el alumno:

Camacho
Apellido paterno

Rodriguez
Apellido materno

Patricia
Nombre(s)

Con registro:

B	0	8	1	5	7	3
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis


Dr. Víctor Manuel López López


Dr. Jorge Meléndez Estrada


M. en I. Felipe López Sánchez


M. en C. Ricardo Contreras Contreras


M. en C. Javier Avila Moreno

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


M. en C. Pino Durán Escamilla
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 1 del mes octubre del año 2010, la que suscribe Patricia Camacho Rodríguez alumna del Programa de Maestría en Ingeniería Civil con número de registro B081573, adscrita a Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. UZ, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Víctor M. López López y cede los derechos del trabajo intitulado "EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO Y DE GASES DE EFECTO INVERNADERO, GENERADAS POR LA ACTIVIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN DE VIALIDADES EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección damy103@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

PATRICIA CAMACHO RODRÍGUEZ

Agradecimientos

A mi mamá y a Francisco, familiares, amigos y sector académico que hicieron posible la realización de este proyecto, así como a:

- Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de México,
- Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventario de Emisiones de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal,
- Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura-Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional,
- Viabilis Infraestructura, S.A. de C.V.

Evaluación de las emisiones de contaminantes criterio y de gases de efecto invernadero, generadas por la actividad de la construcción de vialidades en la Zona Metropolitana del Valle de México.

CONTENIDO

Resumen	3
Abstract	4
Glosario	5
Índice de tablas y figuras	7
Introducción	9
Campo de estudio	12
Justificación	19
Objetivo general	21
Objetivos específicos	21
CAPÍTULO 1 INFORMACIÓN DESCRIPTIVA DEL ÁREA DE ESTUDIO	22
<i>1.1 Datos básicos de la Zona Metropolitana del Valle de México</i>	<i>22</i>
1.1.1 Localización geográfica	22
1.1.2 Clima	25
1.1.3 Viento	25
1.1.4 Temperatura	26
1.1.5 Inversiones térmicas	26
1.1.6 Capa de mezclado	27
1.1.7 Vivienda	28
1.1.8 Población	29
1.1.9 Industria	29
1.1.10 Servicios	30
1.1.11 Transporte	30
1.1.12 Uso de suelo	32
1.1.13 Consumo energético	33
CAPÍTULO 2 CALIDAD DEL AIRE DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO	35
<i>2.1 Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México</i>	<i>35</i>
<i>2.2 Gestión de la calidad del aire de la ZMVM</i>	<i>38</i>
<i>2.3 Principales contaminantes atmosféricos en la ZMVM</i>	<i>45</i>
2.3.1 Partículas	46
2.3.2 Bióxido de azufre (SO ₂)	49
2.3.3 Monóxido de carbono (CO)	50
2.3.4 Óxidos de nitrógeno (NO _x)	52
2.3.5 Compuestos orgánicos volátiles (COV)	53
2.3.6 Gases efecto invernadero	53
CAPÍTULO 3 INVENTARIO DE EMISIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO DE LA ZMVM, 2008	57
<i>3.1 Emisiones por entidad</i>	<i>62</i>
CAPÍTULO 4 INVENTARIO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LA ZMVM	64
<i>4.1 Emisiones de GEI y consumo energético</i>	<i>67</i>
CAPÍTULO 5 CONSTRUCCIÓN DE VIALIDADES EN LA ZMVM	69
<i>5.1 Distrito Federal</i>	<i>70</i>
<i>5.2 Estado de México</i>	<i>73</i>
<i>5.3 Zona Metropolitana del Valle de México</i>	<i>78</i>

CAPÍTULO 6	EMISIONES CONTAMINANTES EN LA ACTIVIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN Y METODOLOGÍAS PARA SU ESTIMACIÓN	81
6.1	<i>Métodos de estimación de emisiones</i>	83
6.1.1	Carga y descarga de material (pilas de material)	86
6.1.2	Emisiones fugitivas (erosión por viento)	87
6.1.3	Caminos sin pavimentar	90
6.1.4	Caminos pavimentados	90
6.1.5	Demolición	91
6.1.6	Emisiones de la maquinaria	93
6.1.7	Emisiones por uso de pinturas	93
6.1.8	Emisiones por asfaltado	94
6.1.9	Balance de combustibles	95
CAPÍTULO 7	EMISIONES DE LA CONSTRUCCIÓN DE VIALIDADES EN LA ZMVM	97
7.1	<i>Selección de un método óptimo de estimación de emisiones de la construcción de vialidades</i>	97
7.2	<i>Estimación de emisiones de la construcción de vialidades</i>	100
7.2.1	Emisiones de la vialidad Los Remedios-Ecatepec	104
7.2.2	Emisiones de otras 15 obras viales de la ZMVM	108
7.2.3	Emisiones de totales por la construcción de vialidades en la ZMVM	109
CAPÍTULO 8	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	110
8.1	<i>Obtención de factores de emisión por contaminante</i>	111
8.2	<i>Elaboración de escenarios de emisión</i>	112
8.3	<i>Evaluación de escenarios de emisión</i>	114
8.4	<i>Incertidumbre</i>	121
Conclusiones		123
Recomendaciones		125
Bibliografía		127

Resumen

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) tiene una serie de características fisiográficas y climáticas que contribuyen de manera adversa en los problemas de contaminación del aire, en años recientes el ozono y las partículas son contaminantes que varias veces al año rebasan sus valores de norma. Las autoridades ambientales además de monitorear las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, desarrollan los Inventarios de Emisiones, con la finalidad de conocer el origen de la contaminación atmosférica e implementar medidas de mitigación. Actualmente no se evalúa ningún tipo de emisiones de la construcción en dichos documentos.

Si bien la construcción es considerada como una de las principales actividades generadoras de empleos, también es importante consumidora de recursos naturales y por lo tanto, es una fuente significativa de contaminantes. Este documento presenta tres escenarios de evaluación de emisiones de la construcción de vialidades, los cuales sirvieron para determinar que es una categoría *clave* que debe ser incluida en Inventarios de Emisiones, básicamente, por la emisión de partículas y compuestos orgánicos volátiles.

El primer escenario se estructuró con las emisiones provenientes de datos reales de la vialidad ejemplo -Río de los Remedios- y quince vialidades más, calculadas con un modelo de estimación de emisiones. El segundo escenario incluye las emisiones reales de Río de los Remedios, seis obras viales estimadas con factores de emisión provenientes de la vialidad ejemplo y nueve obras con calculadas con el modelo. Por último, en el tercer escenario se cuantifican las emisiones de Río de los Remedios y las quince obras restantes, estimadas con los factores de emisión obtenidos de dicha vialidad.

Finalmente, se plantea una serie de metodologías para la estimación de emisiones por etapa o actividad de la construcción, las cuales pueden ser adoptadas por las autoridades en materia ambiental a cualquier nivel de gobierno. De manera general, las metodologías estiman las siguientes emisiones: carga y descarga de material, fugitivas por erosión eólica, caminos pavimentados y sin pavimentar, demolición, maquinaria y equipo de construcción, uso de pinturas, asfaltado y combustibles.

Abstract

The Metropolitan Area of Mexican Valley (MVMA) has a series of climatic and physiographic characteristics that contribute adversely to the air pollution in recent years, ozone and particulate matter are pollutants that several times a year beyond its values standard. The environmental authorities as well as monitoring the concentrations of air pollutants, develop Emission Inventories, in order to know the source of air pollution and implement mitigation measures. Currently not evaluated any emissions from the construction in these documents.

While construction is considered as a major employment generating activities is also important consumer of natural resources and therefore a significant source of pollutants. This paper presents three scenarios for assessing emissions from the construction of roads and determine which is a *key category* that should be included in Emissions Inventories, primarily by the emission of particulates and volatile organic compounds.

The first stage was structured with emissions from real data of road-Río de los Remedios and fifteen more roads, calculated with a model for estimating emissions. The second stage includes the Río de los Remedios emissions, six roads using emission factors and nine roads calculated using a model. Finally, the third stage, are Río de los Remedios emissions and the remaining fifteen roads, estimated using emission factors.

It paper raises some methodologies for estimating emissions per step or construction activity, which can be taken by the authorities in environmental matters at any level of government. In general, methodologies consider the following issues: loading and unloading, fugitive by wind erosion, paved and unpaved roads, demolition, construction equipment, use of paints, asphalt and fuel.

Glosario

bhp	Brake Horse Power = caballos de potencia o de fuerza. Se define como la potencia necesaria para elevar verticalmente a la velocidad de 1 pie/minuto un peso de 33000 libras.
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CORENA	Comisión de Recursos Naturales del la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal
CORENA	
COT	Compuestos orgánicos totales
COV	Compuestos orgánicos volátiles
ELAC	Estrategia Local de Acción Climática del Gobierno del Distrito Federal
GEI	Gases de efecto invernadero
Gigatonelada	Mil millones de toneladas (Gt), 109 toneladas
IMECA	Índice Metropolitano de la Calidad del Aire
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KRV/MT	Kilometros Recorridos por los Vehículos/Vehicles Mile Traveled
LEGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y de Protección al Ambiente
MIA	Manifestación de Impacto Ambiental
micrómetro/micra	Unidad de longitud equivalente a una millonésima parte de un metro, 1 $\mu\text{m} = 10^{-6}$ m
msnm	Metros sobre el nivel del mar
N ₂ O	Óxido nitroso
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
NOx	Óxidos de nitrógeno
O ₃	ozono
Petajoule	10 ¹⁵ Joules. Joule o Julio = unidad del Sistema Internacional para energía, trabajo y calor. 1 J = 1 N/m (kg/m ² /s ²), 0.239 calorías
PM ₁₀	Partículas menores a 10 micrómetros o micras
PM _{2.5} .	Partículas menores a 2.5 micrómetros, o micras
Potencial de	Efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo, que produce una liberación instantánea de 1 kg de un gas de efecto invernadero,

calentamiento global (GWP)	en comparación con el causado por el CO ₂ . Se consideran los efectos radiactivos de cada gas, así como sus diferentes tiempos de permanencia en la atmósfera. Nos revela en qué medida el efecto invernadero causado por este gas, supera el efecto del CO ₂ . CO ₂ = 1, CH ₄ = 25 y N ₂ O = 298
ppm	Partes por millón
PROAIRE	Programa para Mejorar la Calidad el Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México
RTP	Red de Transporte de Pasajeros del Distrito Federal
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México
SO ₂	Dióxido de azufre
STE	Sistema de Transportes Eléctricos del Distrito Federal
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
US-EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (Environmental Protection Agency)
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
µg/m ³	Microgramos por metro cubico. Unidad de masa del Sistema Internacional que equivale a la milmillonésima parte de un kilogramo (10 ⁻⁹ kg) o a la millonésima de un gramo (10 ⁻⁶ g)

Índice de tablas y figuras

Figuras

Figura 1 Emisiones de GEI, 2006.....	13
Figura 1.1 Ubicación geográfica de la ZMVM 2008	23
Figura 1.2 Temperatura máxima, mínima y promedio mensual, 2008	26
Figura 1.3 Frecuencia de inversiones térmicas en el año 2008.....	27
Figura 1.4 Altura promedio mensual de la capa de mezclado del año 2008.....	28
Figura 1.5 Suelo de Conservación del Distrito Federal.....	33
Figura 1.6 Consumo energético histórico por sector, ZMVM 1990 -2006	34
Figura 1.7 Demanda de energía por sector, ZMVM 2008	34
Figura 2.1 Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2009	36
Figura 2.2 Proceso de gestión de la calidad del aire de la ZMVM	39
Figura 2.3 Acciones de mitigación en materia de aire-Plan Verde del D.F.....	43
Figura 2.4 Comportamiento anual de la concentración de PM ₁₀	48
Figura 2.5 Comportamiento anual de la concentración de PM _{2,5}	49
Figura 2.6 Comportamiento anual de la concentración de SO ₂	50
Figura 2.7 Comportamiento anual de la concentración del CO	51
Figura 2.8 Comportamiento anual de la concentración del NO ₂	53
Figura 3.1 Contribución de emisiones por tipo de fuente y contaminante, 2008.....	58
Figura 3.2 Emisiones de la ZMVM por entidad en el 2006.....	63
Figura 4.1 Contribución porcentual de GEI por tipo de fuente	65
Figura 4.2 Principales categorías de emisión de GEI en la ZMVM, 2008 [% CO ₂ eq.].....	68
Figura 5.1 Red vial en construcción en el Estado de México.....	73
Figura 5.2 Trazo de la vialidad Los Remedios-Ecatepec	75
Figura 5.3 Anillo periférico	79
Figura 7.1 Ejemplo de información de entrada del <i>RoadConstructionModel</i>	99
Figura 7.2 Ejemplo de información de salida del <i>RoadConstructionModel</i>	99
Figura 7.3 Los Remedios-Ecatepec	100
Figura 7.4 Imágenes de la construcción de la vialidad los Remedios-Ecatepec	102
Figura 7.5 Mitigación de emisiones de partículas	105
Figura 7.6 Ejemplo de actividades generadoras de partículas	106
Figura 7.7 Ejemplo de maquinaria utilizada en la vialidad los Remedios-Ecatepec	107

Tablas

Tabla 1 Principales categorías de estimación en los inventarios de emisiones	16
Tabla 1.1 Delegaciones y municipios de la ZMVM	24
Tabla 2.1 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire	36
Tabla 2.2 Número de días con valores del IMECA superiores a 100 puntos	37
Tabla 2.3 Medidas de reducción de emisiones del PROAIRE 2002-2010	41
Tabla 2.4 Cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental.....	46
Tabla 2.5 Límites para partículas en suspensión	47

Tabla 3.1 Inventario de emisiones anuales de la ZMVM, 2008	57
Tabla 3.2 Inventario de emisiones desagregado de la ZMVM, 2008.....	60
Tabla 3.3 Inventario de emisiones porcentual, ZMVM, 2008	61
Tabla 3.4 Contribución de emisiones por entidad, 2008.....	62
Tabla 4.1 Emisiones de GEI por contaminante, ZMVM-2008.....	65
Tabla 4.2 Emisiones totales de GEI, ZMVM-2008.....	65
Tabla 4.3 Emisiones de GEI desagregadas por categoría, ZMVM-2008	66
Tabla 4.4 Emisiones de CO ₂ equivalente y consumo energético, ZMVM-2008.....	67
Tabla 5.1 Sistema de Red de Metrobús de la Ciudad de México	71
Tabla 5.2 Autopistas en construcción por parte del Gobierno del Estado de México	74
Tabla 5.3 Circuito Exterior Mexiquense (Segunda etapa, tramo 1° y 2°)	74
Tabla 5.4 Circuito Exterior Mexiquense (Tercera etapa).....	75
Tabla 5.5 Los Remedios-Ecatepec	75
Tabla 5.6 Periférico Norte	76
Tabla 5.7 Sistema TransMexiquense Bicentenario.....	76
Tabla 5.8 Tramos viales construidos y/o en construcción, ZMVM.....	80
Tabla 6.1 Factor de emisión de PM ₁₀ por sitio de construcción	85
Tabla 6.2 Actividades generadoras de emisiones y métodos de estimación	86
Tabla 7.1 Longitud y superficie estimada de 2007 a 2009	101
Tabla 7.2 Emisiones generadas por la obra vial Los Remedios-Ecatepec [ton/año]	104
Tabla 7.3 Emisiones de partículas por la obra vial Los Remedios-Ecatepec [ton/año]	105
Tabla 7.4 Emisiones de 15 obras viales en la ZMVM, durante 2007-2009 [ton/año]	108
Tabla 7.5 Emisiones totales de la construcción de vialidades en la ZMVM [ton/año]	109
Tabla 8.1 Factores de emisión para construcción de vialidades tipo puente (kg/m ²).....	111
Tabla 8.2 Escenarios de emisiones por la construcción de vialidades	113
Tabla 8.3 Inventario de emisiones de la ZMVM 2008 – Línea base	114
Tabla 8.4 Inventario de emisiones de la ZMVM 2008 - Escenario inicial	115
Tabla 8.5 Contribución y posición de PM ₁₀ de la construcción de vialidades del Escenario inicial	115
Tabla 8.6 Contribución y posición de PM _{2,5} de la construcción de vialidades de Escenario inicial	116
Tabla 8.7 Inventario de emisiones de la ZMVM 2008 - Escenario combinado.....	116
Tabla 8.8 Contribución y posición de PM ₁₀ de la construcción de vialidades del Escenario combinado	117
Tabla 8.9 Contribución y posición de PM _{2,5} de la construcción de vialidades del Escenario combinado.....	118
Tabla 8.10 Inventario de emisiones de la ZMVM 2008 - Escenario homogéneo	118
Tabla 8.11 Contribución y posición de PM ₁₀ de la construcción de vialidades del Escenario homogéneo	119
Tabla 8.12 Contribución y posición de PM _{2,5} de la construcción de vialidades del Escenario homogéneo ...	119
Tabla 8.13 Contribución y posición de COV de la construcción de vialidades del Escenario homogéneo.....	120

Introducción

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), tiene una serie de características fisiográficas y climáticas únicas que contribuyen de manera adversa en los problemas de contaminación del aire. Su posición latitudinal ocasiona que reciba una radiación solar intensa que acelera la formación fotoquímica de contaminantes atmosféricos como el ozono y las partículas secundarias y cabe mencionar que según estudios atmosféricos de la ZMVM, del 37% al 50% de las PM_{10} son de origen geológico.

Aunado a esto, su ubicación en el centro del país permite que a lo largo del año, la ZMVM resulte afectada por sistemas anticiclónicos, los cuales mantienen el cielo despejado y aumentan la capacidad fotoquímica de la atmósfera; estos sistemas también inducen a que la velocidad de los vientos disminuya cerca de la superficie del suelo, situación que inhibe el movimiento vertical y horizontal del aire, dificultando la dispersión de los contaminantes.

La calidad del aire de la ZMVM, también depende de las emisiones contaminantes que se generan en ella, como consecuencia del crecimiento poblacional que impulsaron las actividades urbanas e industriales en el Valle de México a partir de los años cuarenta. Para enfrentar esta problemática y dar respuesta a los altos niveles de contaminación, las autoridades ambientales, además de monitorear en forma permanente y continua las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, desarrollan los inventarios de emisiones para conocer el origen de la contaminación e implementar medidas de mitigación.

Los inventarios de emisiones que se desarrollan actualmente en la ZMVM, incluyen una gran cantidad de fuentes emisoras; sin embargo, en lo que se refiere a las partículas de origen geológico, aún no se evalúan las que son generadas por la actividad de la construcción.

Por lo anterior y debido a la gran cantidad de obras viales que se están llevando a cabo en la Ciudad de México, el presente documento pretende realizar una estimación de los principales contaminantes¹ generados por las obras viales; la cual servirá como base para conocer la contribución por dichas obras en los inventarios de emisiones y establecer una propuesta de cálculo de emisiones.

Además de los problemas de calidad del aire de la ZMVM, el cambio climático es uno de los más grandes retos a los que se enfrentan hoy las áreas urbanas. El cambio climático acelerado es resultado de la actividad humana, específicamente por la intensidad con la que utilizamos combustibles fósiles, y por la destrucción y pérdida de grandes áreas de selvas y bosques.

Sin acciones para mitigar las emisiones que aceleran el cambio climático, éste puede traer alteraciones irreversibles de los balances biológicos que hacen posible la vida en el planeta. Por lo pronto, estos cambios de clima tienen ya efectos negativos sobre comunidades humanas en prácticamente todo el mundo, lo que se refleja en pérdida de vidas, migración, pérdida de biodiversidad y en altos costos económicos.

Por su tamaño en términos de población y de actividad económica, por ser la sede de los poderes de la República, y por el papel que tiene nuestro país en el mundo, la Ciudad de México es, al mismo tiempo, un contribuyente al problema ambiental, un actor de gran valor simbólico y un espacio donde la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático se convierte en una cuestión de alta prioridad.

En el marco del Plan Verde y de un conjunto de políticas públicas y programas dirigidos a mejorar la calidad de vida de los habitantes de la Ciudad de México, se ha generado del Programa de Acción Climática de la Ciudad de México, el cual integra las principales acciones que realiza actualmente el Gobierno del Distrito Federal, con la finalidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

¹ PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO, NO_x, COV.

Sin embargo, aún cuando en dicho programa se proponen medidas estratégicas para la reducción de emisiones de GEI, no se tienen contempladas las emisiones generadas por la construcción de corredores viales, los cuales son proyectos prioritarios del Gobierno del Distrito Federal, como parte de la ampliación y mejora del transporte público.

Campo de estudio

Los niveles de contaminación del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) muestran en los últimos 20 años una disminución considerable, sin embargo, aun quedan contaminantes que siguen presentando concentraciones por arriba de los valores establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental, como son las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, además del ozono. Debido a esto, el mejoramiento de la calidad del aire es uno de los retos que, a pesar de los constantes esfuerzos hechos por ciudadanos y autoridades, aún representa un desafío para la Ciudad de México (SMA-GDF, 2007).

Aún cuando todos los contaminantes son importantes por sus efectos adversos, el deterioro de la calidad del aire de la ZMVM debido al material particulado, se considera una prioridad de atención en el PROAIRE 2002-2010².

En el caso de las partículas PM_{10} , el número de días con una calidad del aire aceptable se ha incrementado de 162 en el año 1996 a 352 en el año 2007; no obstante, el promedio anual para exposición crónica de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aun se mantiene por encima del valor de la *Norma Oficial Mexicana de PM_{10}* (SMA-GDF, 2008a). Es necesario mencionar que las variaciones anuales que muestra este contaminante son debidas en gran parte a las condiciones climáticas de sequía que cambian año con año.

En la Ciudad de México alrededor de 7.3 millones de habitantes viven en lugares en donde la concentración promedio anual de PM_{10} excede el valor de su norma. Las zonas con mayor riesgo se encuentran en los municipios conurbados del Estado de México localizados en el norte y poniente de la ciudad (SMA-GDF, 2009).

² Programa para Mejorar la Calidad el Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002-2010.

Referente a las partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), tenemos que el número de días con una calidad del aire aceptable se ha incrementado de 352 en el año 2004 a 360 en el año 2006; sin embargo, el promedio anual para exposición crónica de $15 \mu g/m^3$, aún se mantiene por encima del valor de la *Norma Oficial Mexicana de $PM_{2.5}$* .

Durante 2007, las tendencias del monóxido de carbono y dióxido de azufre se mantuvieron en niveles que indican que están controlados, con concentraciones por debajo de los límites de las Normas Oficiales Mexicanas. En el caso de los óxidos de nitrógeno no se observa una tendencia clara o su tendencia es creciente en algunas estaciones de monitoreo, lo cual es un indicativo de la dificultad que implica el control de este contaminante (SMA-GDF, 2008d).

Según estimaciones publicadas por nuestra autoridad ambiental federal, referente a las emisiones de GEI a nivel nacional y presentadas en la Cuarta Comunicación de México ante la UNFCCC, México generó 711.6 millones de toneladas de CO_2 equivalente al año 2006; con esto significa que nuestro país contribuye con el 1.5% a las emisiones mundiales de GEI generadas por el consumo de combustibles fósiles³ (SEMARNAT-INE, 2009).

Para ese mismo año se estimaron 58.9 millones de toneladas de CO_2 equivalente en la ZMVM, lo que representaba el 8% de las emisiones nacionales de GEI (Figura 1). Sin embargo, el último Inventario de Emisiones de GEI del año 2008, actualizó dicha cifra a 51.5 millones de toneladas de CO_2 equivalente.



Fuente: Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2008-2012.

Figura 1 Emisiones de GEI, 2006

³Emisiones reportadas con base en Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, 1990-2006.

Para identificar la contaminación atmosférica, un instrumento de gran utilidad son los inventarios de emisiones, los cuales son un conjunto de datos que caracterizan las liberaciones de contaminantes y sus fuentes emisoras.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y de Protección al Ambiente (LEGEEPA), los contempla como una herramienta básica en lo que se refiere a la prevención y control de la contaminación de la atmósfera. Asimismo, son un elemento fundamental en los programa de gestión de la calidad del aire.

- **Artículo 111.-** Para controlar, reducir o evitar la contaminación de la atmósfera, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales tendrá las siguientes facultades:
 - II.-** Integrar y mantener actualizado el **inventario de las fuentes emisoras de contaminantes** a la atmósfera de jurisdicción federal, y coordinarse con los gobiernos locales para la integración del inventario nacional y los regionales correspondientes

Los inventarios de emisiones, deben ser un proceso continuo para mantener su utilidad, entre sus principales aplicaciones se pueden mencionar:

- Permite identificar las fuentes de emisión
- Conocer la contribución por fuente y principales contaminantes
- Desarrollar, aplicar y evaluar medidas de control de emisiones
- Evaluar la efectividad de los programas ambientales y de salud
- Es el insumo base de los modelos de calidad del aire
- Localiza áreas geográficas y grupos expuestos a altas concentraciones de contaminantes
- Diseñar planes y programas para prevenir y mejorar la calidad del aire.
- Medidas específicas por tipo de fuente
- Es un instrumento que puede ser utilizado para fijar el monto de las sanciones que se apliquen a las fuentes contaminantes.

Actualmente, los inventarios de emisiones (de contaminantes criterio, tóxicos y GEI), evalúan de manera general, cuatro tipos de fuentes⁴ contaminantes: *puntuales, de área, móviles y naturales*; dentro de éstas, se agrupan una gran cantidad de categorías contaminantes (ver Tabla 1).

Aún cuando los inventarios de emisiones incluyen una cantidad considerable de categorías contaminantes, existen algunas que por falta de información para su estimación, no ha sido posible evaluarlas, entre estas últimas se pueden mencionar las siguientes:

- Construcción:
 - Movimiento de tierras y manejo de material
 - Edificios y viviendas
 - Mantenimiento y reparación de calles
 - Zanjas para conductos (agua, gas, telefonía, redes, etc.)
- Vehículos:
 - Operación de maquinaria y equipo de construcción
 - De paso por la Ciudad
- Agricultura:
 - Movimiento de tierras para preparación cultivos
 - Quemadas controladas
 - Emisiones extraordinarias:
 - Quema de cohetes, llantas y juegos de artificio.
- Doméstico y servicios:
 - Chimeneas
 - Plantas de autogeneración y cogeneración

Con el fin de integrar un inventario de emisiones lo más completo posible es imprescindible considerar otras fuentes de contaminación, además de las que ya se encuentran sujetas a reporte.

⁴ **Puntuales:** Fuentes fijas o industriales. Instalación que desarrolla operaciones o procesos industriales.

Área: Establecimientos que emiten cantidades pequeñas de contaminantes pero en conjunto, sus emisiones son considerables (comercios, servicios, casas habitación y vehículos automotores que no circulan por carreteras, entre las principales).

Móviles: Vehículos automotores que circulan por calles y carreteras.

Naturales: Fenómenos o procesos naturales. Vegetación y suelos.

Tabla 1 Principales categorías de estimación en los inventarios de emisiones

Fuente	Categoría
Fuentes puntuales	Productos alimenticios, bebidas y tabaco
	Textiles, prendas de vestir e industria del cuero
	Industria de la madera y productos de madera
	Papel y productos de papel, imprenta y editoriales
	Sustancias químicas, productos derivados del petróleo y del carbón, de hule y de plástico
	Productos minerales no metálicos.
	Industrias metálicas básicas
	Productos metálicos, maquinaria y equipo.
	Otras industrias manufactureras
	Generación de energía eléctrica
Fuentes de área	Combustión comercial/institucional
	Combustión habitacional
	Operación de aeronaves
	Locomotoras (foráneas/ patio)
	Terminales de Autobuses de pasajeros
	Recubrimiento de superficies industriales
	Pintura automotriz
	Recubrimiento de superficies arquitectónicas
	Pintura tránsito
	Limpieza de superficie industrial
	Lavado en seco
	Artes gráficas
	Aplicación de asfalto
	Uso comercial y doméstico de solventes
	Distribución y almacenamiento de gasolina
	Carga de combustible en aeronaves
	Distribución y almacenamiento de gas LP
	Fugas en instalaciones de gas LP
	HCNQ en la combustión de gas LP
	Panaderías (fermentación de levaduras)
	Esterilización en hospitales
	Rellenos sanitarios
	Tratamiento de aguas residuales
	Incendios forestales
	Incendios en estructuras
	Emisiones domésticas de amoníaco
	Vialidades pavimentadas
Vialidades sin pavimentar	
Fuentes móviles	Autos particulares
	Taxis
	Combis
	Microbuses
	Pick up
	Vehículos de hasta 3 toneladas
	Tractocamiones
	Autobuses
	Vehículos de más de 3 toneladas
	Motocicletas
Fuentes naturales	Vegetación
	Erosión eólica del suelo

Fuente: SMA-DGF, 2010. Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2008.

Por lo anterior, la elaboración de un inventario más completo, exige incluir las emisiones derivadas de todos aquellos sectores, industriales y de servicios, que afectan el ambiente; sin embargo, una parte muy importante de esos sectores no están sujetos de reporte por ser fuentes temporales, de área o de emisión difusa.

Asimismo, el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes⁵ (RETC, 1996), menciona que una estimación complementaria de emisiones, deberían incluir los siguientes sectores

- Construcción de obras de urbanización
- Construcción e instalaciones industriales
- Construcción en general

La construcción es una de las actividades productivas más importantes del mundo, representando más del 10% del producto bruto global⁶. De acuerdo a cifras de diversos países, se puede advertir que las construcciones acaparan una sexta parte del consumo de agua dulce del mundo, una cuarta parte de su madera y dos quintas partes de sus materiales y energía. Además, consume el 25% de los combustibles fósiles y el 44% de la producción eléctrica (Roodman y Lenssen, 1995).

Se observa que esta enorme utilización de recursos tiene efectos secundarios importantes, a saber: deforestación, contaminación del agua, del aire y del suelo, reducción del ozono estratosférico y riesgo de calentamiento global. Cabe mencionar que en los últimos cien años, la cantidad de CO₂ ha aumentado considerablemente y una tercera parte de las emisiones procede de la quema de combustible fósil destinada para suministrar energía a las construcciones, dicho aumento amenaza a los ecosistemas, la agricultura y los asentamientos humanos, provocando cambios climáticos; mientras tanto, han desaparecido el 20% de los bosques del planeta.

⁵ El RETC es una base de datos nacional con información de sustancias contaminantes emitidas al ambiente: aire, agua, suelo y subsuelo o que son transferidas en el agua residual y/o en los residuos peligrosos. Es una lista de 104 sustancias, además de las emisiones de contaminantes criterio de las fuentes fijas.

⁶ Diseño y Construcción Sustentable en Chile. <http://www.sustentable.cl/portada/Energia/4891.asp> (octubre, 2008)

Asimismo, en todo el mundo la explotación minera de los recursos de hierro, bauxita y cobre para ser utilizados como materiales de construcción, continúa emitiendo grandes cantidades de agentes contaminantes al aire y agua cercanos (Roodman y Lenssen, 1995). En particular, el hierro, el vidrio y la fabricación de ladrillos, consumen una gran cantidad de combustibles fósiles por su producción a altas temperaturas.

Además de lo anterior, la principal incidencia de las actividades de construcción en el medio ambiente se centra en la generación de residuos inertes, constituidos por los denominados residuos de construcción y demolición (RCD) y las tierras excedentes de excavación. Mientras que los primeros se generan principalmente en las obras de edificación, las tierras excedentes de excavación se presentan en mayores volúmenes en las obras civiles, principalmente en obras de infraestructura y autopistas, entre otras (Miliarium, 2009).

Otro impacto ambiental de especial significación en el sector de la construcción son las emisiones a la atmósfera. En primer lugar, son relevantes las emisiones de polvo y partículas, como consecuencia de las actividades de demolición de edificios y estructuras, movimientos de tierras y circulación de maquinaria, entre otras. En segundo lugar, el uso de la maquinaria genera emisiones de partículas y gases contaminantes, entre ellos, el CO₂, el cual es uno de los causantes del denominado efecto invernadero.

Respecto a esto, cabe mencionar que dichas actividades son generadoras de grandes cantidades de material particulado y además, no se incluyen en los inventarios de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México, por lo que es importante evaluar la generación de contaminantes de la construcción, como una fuente significativa de emisiones en las áreas urbanas.

Justificación

Como se ha mencionado, la construcción es una actividad de gran consumo de materiales y generadora de varios contaminantes, básicamente, de material particulado; debido a la importancia que éste tiene en la calidad del aire de la ZMVM, se considera que es una categoría susceptible de ser evaluada e incluida en los inventarios de emisiones de contaminantes.

Además, en el marco del “Nuevo Orden Urbano⁷”, estrategia emprendida por los Gobiernos del Distrito Federal y del Estado de México, existen una gran cantidad de proyectos de obras viales en curso, con la finalidad de enfrentar los retos de carácter metropolitano y regional en materia de transporte público masivo y vialidad. Por su parte, el Gobierno del Distrito Federal planea realizar varias obras viales en diversas zonas de la ciudad, además de repavimentar gran parte de las ya existentes.

En la ZMVM, anualmente se emiten al aire más de 24 mil toneladas de la PM₁₀ de éstas, el 58% son de origen geológico y un 23% son PM_{2.5} (SMA-GDF, 2008b); asimismo, es conveniente reiterar la importancia de la evaluación de estos contaminantes, debido a su efecto dañino a la salud humana y considerar que la construcción es importante generadora de partículas.

Según la Organización Mundial de la Salud (en SMA-GDF, 2008a), 5 millones de niños mueren anualmente en el mundo, por enfermedades relacionadas a la contaminación del aire, este problema se hace relevante, debido a que la población infantil de la ZMVM, representa un 30% de su población y a los problemas de contaminación por partículas que existen en la Ciudad de México

⁷ <http://www.metropoli.org.mx/modules.php?name=News&file=article&sid=3272> (octubre, 2008).

Debido a las numerosas obras viales que se tienen planeadas como parte del desarrollo y ordenamiento del transporte de la Ciudad de México, algunas de las cuales ya se están llevando a cabo; se propone la estimación de emisiones de contaminantes al aire y de gases de efecto invernadero, generadas por la construcción de vialidades durante el periodo de los años 2007 a 2009, con la finalidad de conocer su potencial de contribución a la contaminación atmosférica de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Se establece el periodo de 2007 a 2009 para considerar, en la medida de lo posible, obras finalizadas y que ya hayan pasado por sus diferentes fases de construcción (limpieza de terreno, excavación, construcción, acondicionamiento, entre las principales).

Una vez realizado lo anterior, el presente documento pretende establecer una propuesta de cálculo de emisiones generadas por la actividad de la construcción de vialidades, la cual puede ser implementada por las autoridades ambientales correspondientes en materia de inventario de emisiones.

Objetivo general

1. Establecer una propuesta metodológica para las estimaciones de emisiones contaminantes y de GEI, generadas por la construcción de vialidades, con la finalidad de que se integre a los inventarios de emisiones de la ZMVM.

Objetivos específicos

1. Determinar las formas de evaluación de emisiones de gases y partículas contaminantes de la actividad de la construcción de vialidades, en cada una de las etapas de ejecución.
2. Análisis de las vialidades en construcción de la zona de estudio, con la finalidad de seleccionar una vialidad para ser evaluada y calcular las emisiones por tipo de contaminante.
3. Evaluar la contribución de las emisiones contaminantes al aire y GEI, generadas por la construcción de vialidades, en los inventarios de emisiones de la ZMVM.
4. Establecer una propuesta metodológica para la estimación de emisiones contaminantes al aire, en la actividad de la construcción de vialidades.

Capítulo 1 Información descriptiva del área de estudio

1.1 Datos básicos de la Zona Metropolitana del Valle de México

1.1.1 Localización geográfica

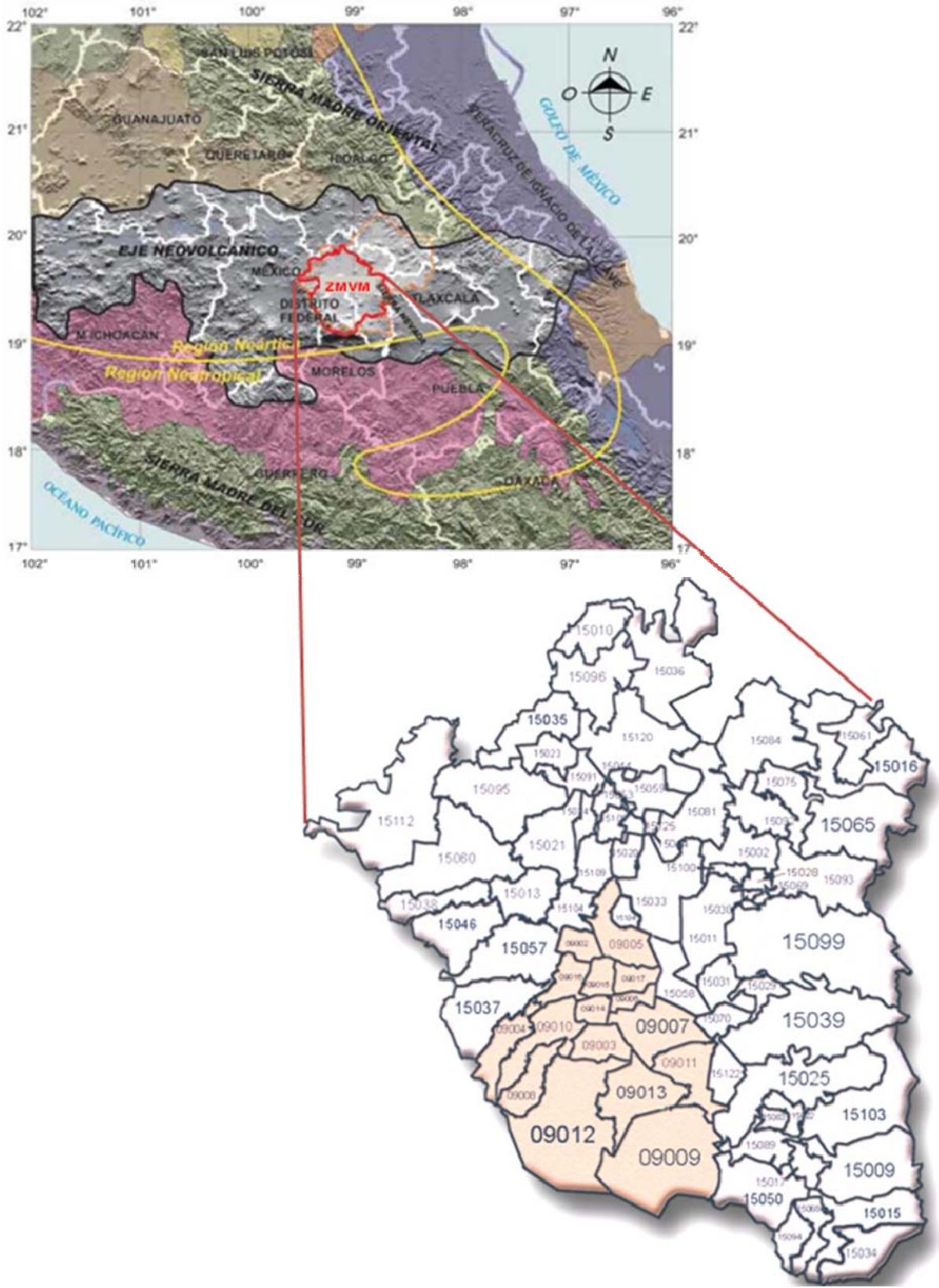
La Zona Metropolitana del Valle de México forma parte de una cuenca endorreica⁸, con una altitud promedio de 2,240 msnm, abarca la totalidad del Distrito Federal y parte del Estado de México. Se ubica en la parte Este de la región conocida como Sistema Neovolcánico Transversal, formando parte del ecosistema de Bosque Templado y de la región fisiográfica del Eje Neovolcánico.

Se sitúa entre los 19° 03´-19° 54´ de latitud Norte, y los 98° 38´-99° 31´ de longitud Oeste (INEGI, 2002).

Por las características de crecimiento, dinámica social, económica y ambiental, en el año 2006 se declaró la ampliación de la ZMVM, la cual quedó integrada por las 16 delegaciones del Distrito Federal y 59 municipios del Estado de México⁹; ésta nueva superficie representa 0.25% de la superficie total del país (Figura 1.1 y Tabla 1.1).

⁸ Área geográfica donde las aguas bajan de las montañas para llegar a un lago y no son vertidas a otro río, lago o mar.

⁹ Gaceta Oficial del Distrito Federal, diciembre de 2006.



Elaboración propia con datos de INEGI 2005 y 2007

Figura 1.1 Ubicación geográfica de la ZMVM 2008

Tabla 1.1 Delegaciones y municipios de la ZMVM

Clave	Delegación	Clave	Municipio
09010	Álvaro Obregón	15002	Acolman
09002	Azcapotzalco	15009	Amecameca
09014	Benito Juárez	15010	Apaxco
09003	Coyoacán	15011	Atenco
09004	Cuajimalpa	15013	Atizapán de Zaragoza
09015	Cuauhtémoc	15015	Atlautla
09005	Gustavo A. Madero	15016	Axapusco
09006	Iztacalco	15017	Ayapango
09007	Iztapalapa	15020	Coacalco de Berriozábal
09008	M. Contreras	15022	Cocotitlán
09016	Miguel Hidalgo	15023	Coyotepec
09009	Milpa Alta	15024	Cuautitlán
09011	Tlahuac	15121	Cuautitlán Izcalli
09012	Tlalpan	15025	Chalco
09017	Venustiano Carranza	15028	Chiautla
09013	Xochimilco	15029	Chicoloapan
		15030	Chiconcuac
		15031	Chimalhuacán
		15033	Ecatepec de Morelos
		15034	Ecatzingo
Cve	Municipio	15035	Huehuetoca
15083	Temamatla	15036	Hueypoxtla
15084	Temascalapa	15037	Huixquilucan
15089	Tenango del Aire	15038	Isidro Fabela
15091	Teoloyucán	15039	Ixtapaluca
15092	Teotihuacán	15044	Jaltenco
15093	Tepetlaoxtoc	15046	Jilotzingo
15094	Tepetlixpa	15050	Juchitepec
15095	Tepotzotlán	15070	La Paz
15096	Tequixquiac	15053	Melchor Ocampo
15099	Texcoco	15057	Naucalpan de Juárez
15100	Tezoyuca	15059	Nextlalpan
15103	Tlalmanalco	15058	Nezahualcóyotl
15104	Tlalnepantla de Baz	15060	Nicolás Romero
15125	Tonanitla	15061	Nopaltepec
15108	Tultepec	15065	Otumba
15109	Tultitlán	15068	Ozumba
15122	Valle de Chalco Solidaridad	15069	Papalotla
15112*	Villa del carbón	15075	San Martín de las Pirámides
15120*	Zumpango	15081	Tecámac

1.1.2 Clima

En la ZMVM, se presenta un clima templado con lluvias en verano, templado húmedo y subhúmedo con lluvias en verano y por último, un clima seco. La temporada de lluvias y humedad relativa alta, se presenta entre junio y octubre, originando que descendan los niveles de algunos contaminantes por la inestabilidad atmosférica.

Los niveles más altos de precipitación se registran en las zonas montañosas y los más bajos en la zona oriente (nororiente principalmente) (INEGI, 2007).

1.1.3 Viento

El viento es uno de los factores más importantes en la contaminación atmosférica, pues a partir de su *dirección*, se identifican los sistemas meteorológicos que afectan a determinado lugar. Asimismo, la *intensidad* es una de las variables que determina, si los contaminantes en capas cercanas a la superficie, se acumulan o se dispersan. Además, la dispersión vertical de los gases contaminantes depende de la estabilidad y turbulencia de la zona, así como del calor y la fricción producida por los vientos y la superficie del suelo.

La entrada principal del viento en el Valle de México se presenta en la zona norte, donde el terreno es más plano. Según la época del año, existe una segunda entrada del viento por la región noreste del Valle; incluso, puede haber viento de sur a norte, cuando el viento en capas medias de la tropósfera es suficientemente intenso como para que, a pesar de la barrera montañosa, se imponga esa dirección, sobre todo en los meses invernales (INEGI, 2005).

1.1.4 Temperatura

La temperatura promedio mensual tiende a presentar un patrón estacional como reflejo de la época del año; los valores más bajos son en la época seca-fría y los más altos en la seca-caliente, los valores moderados ocurren durante la época de lluvias, cuando la formación de nubes es mayor y la insolación es obstruida por éstas. La siguiente gráfica muestra los promedios mensuales de la temperatura, máxima, mínima y promedio para el año 2008 (Figura 1.2).

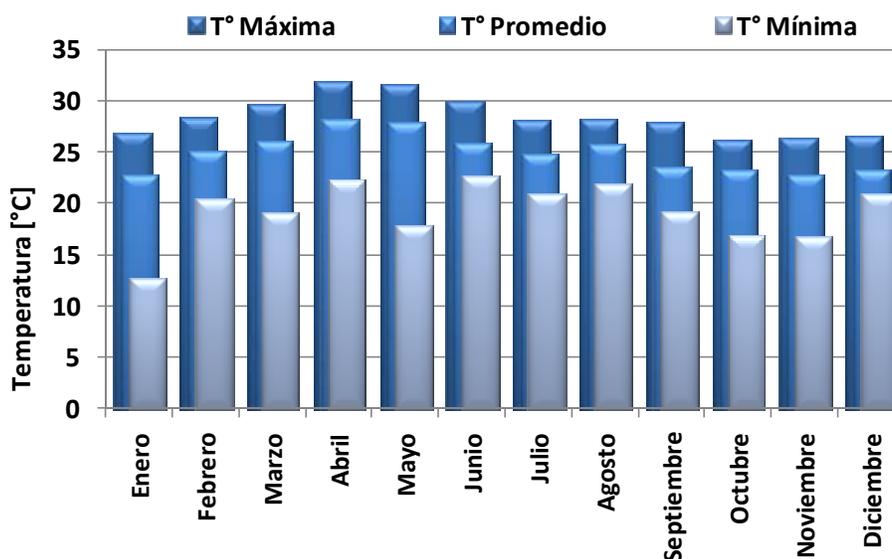


Figura 1.2 Temperatura máxima, mínima y promedio mensual, 2008

1.1.5 Inversiones térmicas

Una inversión térmica se define como el aumento de la temperatura con la altura, ya que lo normal es que disminuya. Tal aumento se puede presentar desde la superficie terrestre y/o en cualquier capa de la atmósfera, o de la troposfera si nos restringimos al espesor donde se presentan los fenómenos meteorológicos que nos afectan directamente (Soler, 2009)¹⁰.

¹⁰ Comunicación personal. Subdirección de Meteorología de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.

Al estar el aire más ligero (caliente) por arriba de aire más pesado (frío), se presenta una estabilidad atmosférica considerable, como para que se frenen los movimientos del aire, debido a que el aire frío y denso de las capas bajas no puede elevarse, se da lugar al estancamiento de contaminantes.

En la ZMVM, las inversiones térmicas normalmente son de tipo radiativas, sobre todo cuando se tiene la presencia de sistemas de alta presión, mismos que propician cielo despejado durante la noche y fuga de calor del suelo, debido a esto, las capas atmosféricas inferiores se enfrían más rápidamente y se forma la inversión térmica (SMA-GDF, 2008b). La Figura 1.3 presenta la frecuencia de inversiones térmicas durante el año 2008.

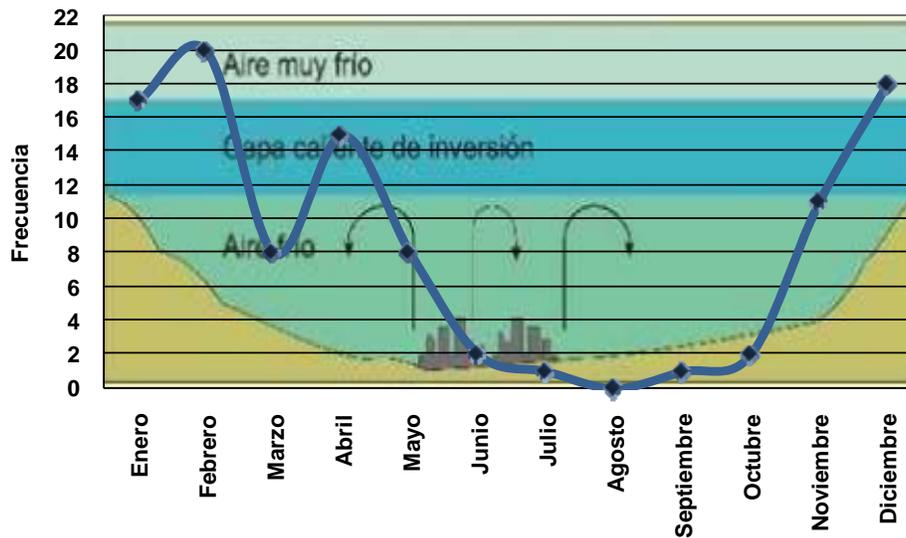


Figura 1.3 Frecuencia de inversiones térmicas en el año 2008

1.1.6 Capa de mezclado

La capa de mezclado es la región de la atmósfera en la cual se dispersan los contaminantes; su altura varía dependiendo de del calentamiento del aire y de la velocidad del viento, por lo tanto, está en función de la estabilidad de la atmósfera.

La capa de mezclado presenta una evolución a través del día y a lo largo del año, proporciona una idea del volumen de aire en el que se está llevando a cabo la mezcla de contaminantes (SMA-GDF, 2008b). En la Figura 1.4 se muestra la altura promedio mensual, de la capa de mezclado para el año 2008.

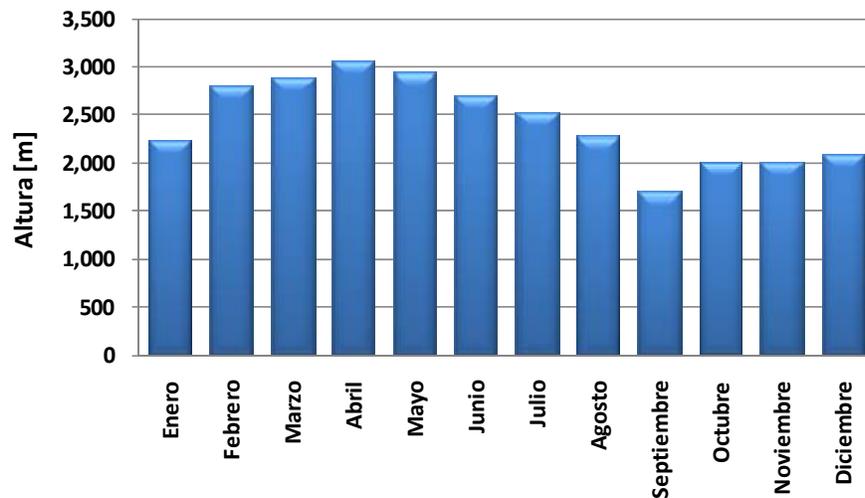


Figura 1.4 Altura promedio mensual de la capa de mezclado del año 2008

En cuanto a la dispersión vertical a través del día, se menciona que la capa de mezclado de la ZMVM no presenta un comportamiento típico como en otros lugares, donde la altura máxima ocurre pocas horas después de la salida del sol (Arya, 2001 en Velasco, E., Márquez C. *et al*, 2007), sino que el máximo ocurre tres o cuatro horas después del medio día.

1.1.7 Vivienda

En general las condiciones de vivienda de las ZMVM son mejores a los promedios nacionales y en particular, el Distrito Federal presenta mayor nivel de equipamiento que las viviendas del Estado de México. Aproximadamente el 98% de las viviendas ubicadas en la ZMVM, cuenta con electricidad, el 96% tiene agua entubada y un 94% con drenaje.

1.1.8 Población

La ZMVM es el principal escenario económico y social del país y cabe destacar, que el Estado de México es la entidad más poblada, seguida por el Distrito Federal. La alta densidad de población y concentración de actividades productivas, implica la presencia de factores de presión ambiental. Según datos del II Censo de Población y Vivienda 2005, la ZMVM registró aproximadamente 20 millones de habitantes, lo cual representa el 19% del total nacional; de éstos, el 44% vive en el Distrito Federal y el 56% en los 59 municipios conurbados del Estado de México.

1.1.9 Industria

Con base en el Censo Económico 2004 realizado por el INEGI¹¹, existen más de 328 mil industrias manufactureras a nivel nacional, y el 16% se encuentra ubicado en la ZMVM, principalmente en grandes parques industriales. En el Distrito Federal existen 28,025 establecimientos del sector manufacturero, con lo cual, ocupa el segundo lugar a nivel nacional.

El subsector dedicado a la producción de alimentos, bebidas y tabaco, es el giro de mayor representación con un 36%, le siguen las manufacturas de productos metálicos con el 23% y la producción de papel y subproductos con el 15%.

En total, el sector industrial consume el 27% de la energía generada por la quema de combustibles fósiles en la ZMVM, en donde el 83% es gas natural, sin embargo, es importante aclarar que es considerado un combustible limpio (SMA-GDF, 2008b).

¹¹ Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

1.1.10 Servicios

La Zona Metropolitana del Valle de México concentra una gran cantidad de actividades de servicios, éstos tienen una participación cada vez mayor en la economía nacional y se han concentrado en las áreas urbanas, consecuencia también de la baja capacidad de respuesta de las actividades industriales para absorber la sobreoferta de mano de obra. Los patrones de consumo de estas actividades, están determinando la intensidad a la que se somete el aprovechamiento de los recursos naturales, así como los volúmenes y grado de contaminación.

Con base en información del Sistema Empresarial Mexicano (SIEM, 2007), la ZMVM concentra aproximadamente 200 mil establecimientos registrados, de los cuales el 94% se dedica al comercio y servicios, y el 93% de ellos se ubican como micro empresas.

1.1.11 Transporte

Entre los problemas que se observan en las vialidades de la ZMVM, se tiene el congestionamiento vehicular ocasionado principalmente por el transporte de pasajeros y de carga, el aumento de los tiempos de traslado tanto de personas como de productos y un mayor consumo de combustibles, lo cual se traduce en mayores emisiones contaminantes por el uso de combustibles fósiles.

La flota vehicular de la ZMVM es de aproximadamente 4.5 millones de vehículos, de los cuales el 64% corresponden a unidades registradas en el Distrito Federal y el 36% restante en el Estado de México (SMA-GDF, 2010). El 95% de la flota vehicular de la ZMVM utiliza gasolina como combustible, el 4% son unidades a diesel y una pequeña proporción utiliza gas licuado de petróleo (GLP) y gas natural (GN).

La flota vehicular de uso particular ha crecido considerablemente, como consecuencia de la falta de un transporte público masivo y eficiente. Es importante hacer mención que según la Encuesta Origen-Destino 2007, los autos particulares constituyen el 80% de las unidades destinadas al transporte de personas y sólo captan cerca del 20% de los viajes que se realizan por persona por día.

De acuerdo al uso de los vehículos, la flota vehicular de la ZMVM que se utiliza para el transporte de personas en vehículos de uso particular (automóviles y motocicletas) representa en 84%, las unidades de uso público constituyen el 7% (taxis, combis, microbuses y autobuses), y el transporte de carga el 9%.

En cuanto a transporte masivo se refiere, existen diversos medios de transporte entre ellos, el Sistema de Transporte Colectivo–Metro (STC-M), cuenta con 11 líneas y 175 estaciones. Al metro se articula la Red de Transporte de Pasajeros del Distrito Federal (RTP). Además, el GDF administra el Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal (STE-DF), que se encarga de la operación de las quince líneas de trolebuses, y el Tren Ligero de la Ciudad de México (RTP y STE, 2009). En agosto de 2006, se inició la construcción del primer sistema ferroviario suburbano de pasajeros, denominado Tren Suburbano.

Por otra parte, el GDF creó el organismo público descentralizado Metrobús, el cual cuenta actualmente con 2 corredores, la primera línea de Indios Verdes a El caminero (sobre la avenida Insurgentes), y la línea 2 que va de la estación Tepalcates en el oriente de la Ciudad, a Tacubaya en el poniente, recorriendo el Eje 4 Sur (Metrobús, 2009).

Aunado a los modos de transporte anteriores, en la ZMVM existe una sólida flota de autobuses, taxis y microbuses urbanos; los cuales están organizados en casi un centenar de rutas concesionadas (agrupaciones que prestan su servicio en una zona restringida de la capital). Cabe mencionar que de casi 22 millones de viajes que se realizan diariamente en la ZMVM, dos terceras partes se realizan en transporte público (GDF, INEGI y GEM, 2007).

1.1.12 Uso de suelo

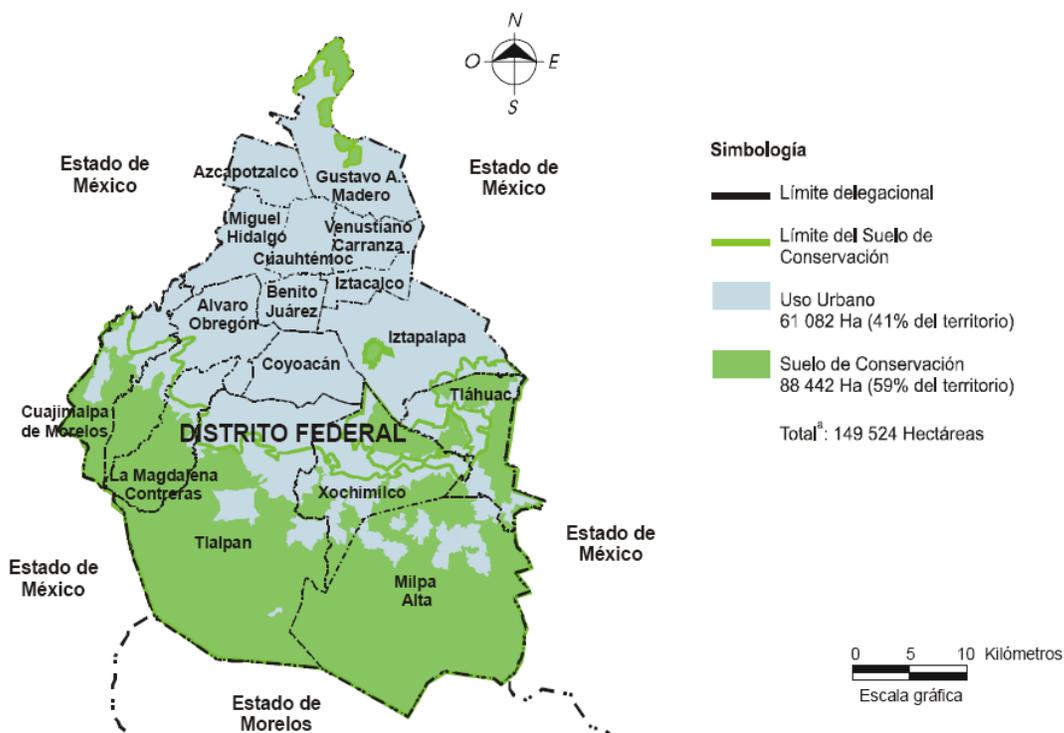
Los usos del suelo que predominan en la ZMVM se pueden clasificar en: bosques, pastizales, matorrales, agricultura y zona urbana. En particular, con respecto a la agricultura, las tierras de temporal son las que ocupan mayor superficie y se localizan desde las llanuras hasta las altas sierras (INEGI, 2005).

El Suelo de Conservación Ecológica del Distrito Federal (Figura 1.5), constituye un patrimonio natural para el bienestar de las generaciones futuras, ya que proporciona bienes y servicios ambientales que permiten la viabilidad de la Ciudad, entre los que se encuentran: la captación e infiltración de agua al manto acuífero, la regulación del clima, el mejoramiento de la calidad del aire, hábitat para la biodiversidad, oportunidades para la educación, investigación y recreación, producción de alimentos y materias primas, entre otros (CORENA,2008)¹².

La Declaratoria del Suelo de Conservación determina la línea limítrofe entre el área de desarrollo urbano y el área de conservación ecológica, el destino de su zona de protección y los usos y destinos para el área de conservación ecológica y para los poblados del Distrito Federal. Cubre una superficie de 88,442 hectáreas y constituye poco más del 59% de la superficie total del Distrito Federal, limitando al norte, este y oeste con el Estado de México y al sur con Morelos (INEGI, 2002).

Un aspecto importante de conocer el uso de suelo de una zona, radica en que se puede inferir, con base en él, en donde se distribuyen las emisiones y las fuentes contaminantes que las generan.

¹² Comisión de Recursos Naturales del la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.



^a Estimación de CORENA con base en métodos propios, razón por la cual difiere de la cifra del INEGI incluida en el capítulo 1 sobre "Territorio y Dimensión Socioeconómica".
FUENTE: Gobierno del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente. Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural. México, DF, 2002.

Figura 1.5 Suelo de Conservación del Distrito Federal

1.1.13 Consumo energético

Toda vez que el consumo de energía es el enlace entre las actividades cotidianas y la generación de contaminantes, a continuación se hace una breve descripción de dicho consumo en la ZMVM. Para el año 2008 se consumieron 576 Petajoules de energía, el sector más importante por su demanda energética es el del transporte y ha tenido una participación promedio de aproximadamente 60% del consumo, le sigue el sector industrial con el 24% en consumo y el residencial con el 13% (SMA-GDF, 2009).

En la Figura 1.6 se muestra la tendencia del consumo energético de la ZMVM y la Figura 1.7 muestra la participación de cada sector y sus combustibles. El aumento del consumo energético por parte del sector transporte, es reflejo del continuo crecimiento de la flota vehicular.

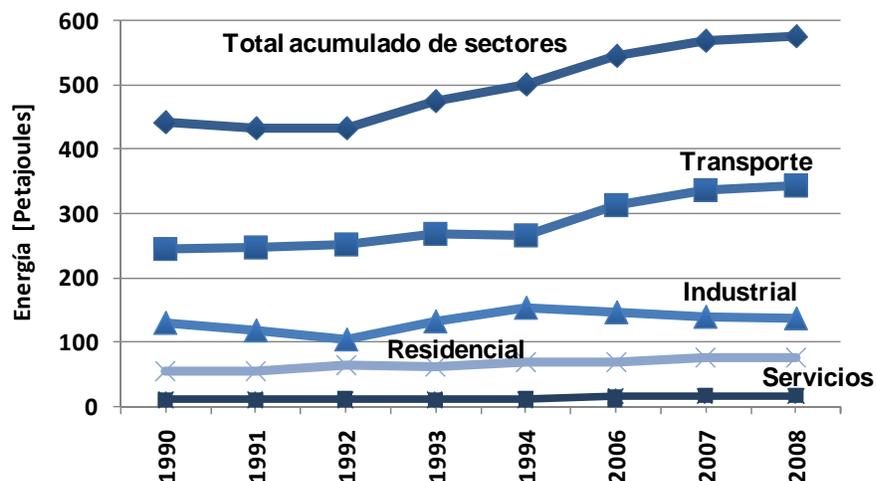


Figura 1.6 Consumo energético histórico por sector, ZMVM 1990 -2006

Para el año 2008, el consumo promedio diario de los combustibles en la ZMVM, se estimó en 310 mil barriles equivalentes de gasolina; es decir más 60 millones de litros por día. A continuación se presenta la distribución de la demanda de combustibles por sector.

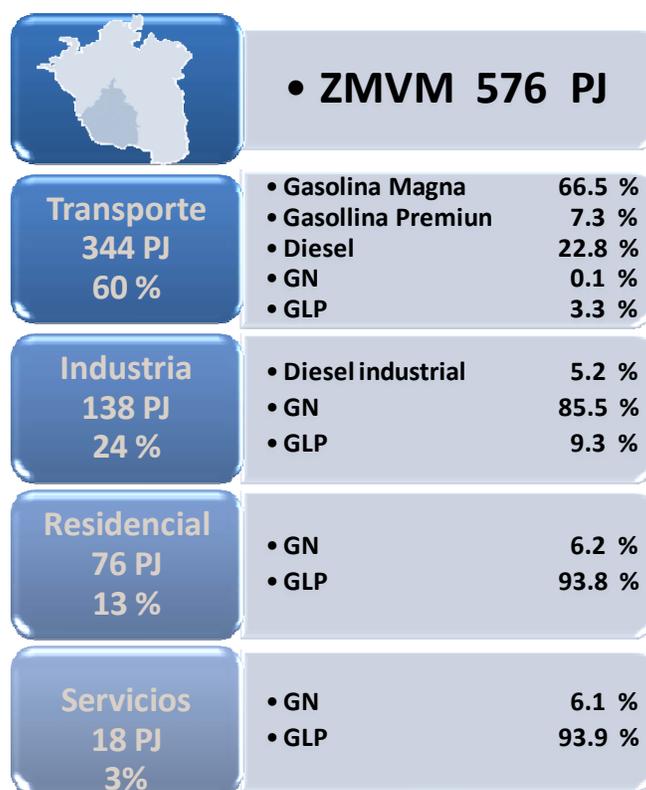


Figura 1.7 Demanda de energía por sector, ZMVM 2008

Capítulo 2 Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México

2.1 Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México

En el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) se realizan las mediciones de gases, partículas suspendidas y parámetros meteorológicos, así como el muestreo y análisis de partículas suspendidas y agua de lluvia (depósito húmedo). El SIMAT integra cuatro subsistemas:

- Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)
- Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)
- Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA)
- Red de Depósito Atmosférico (REDDA).

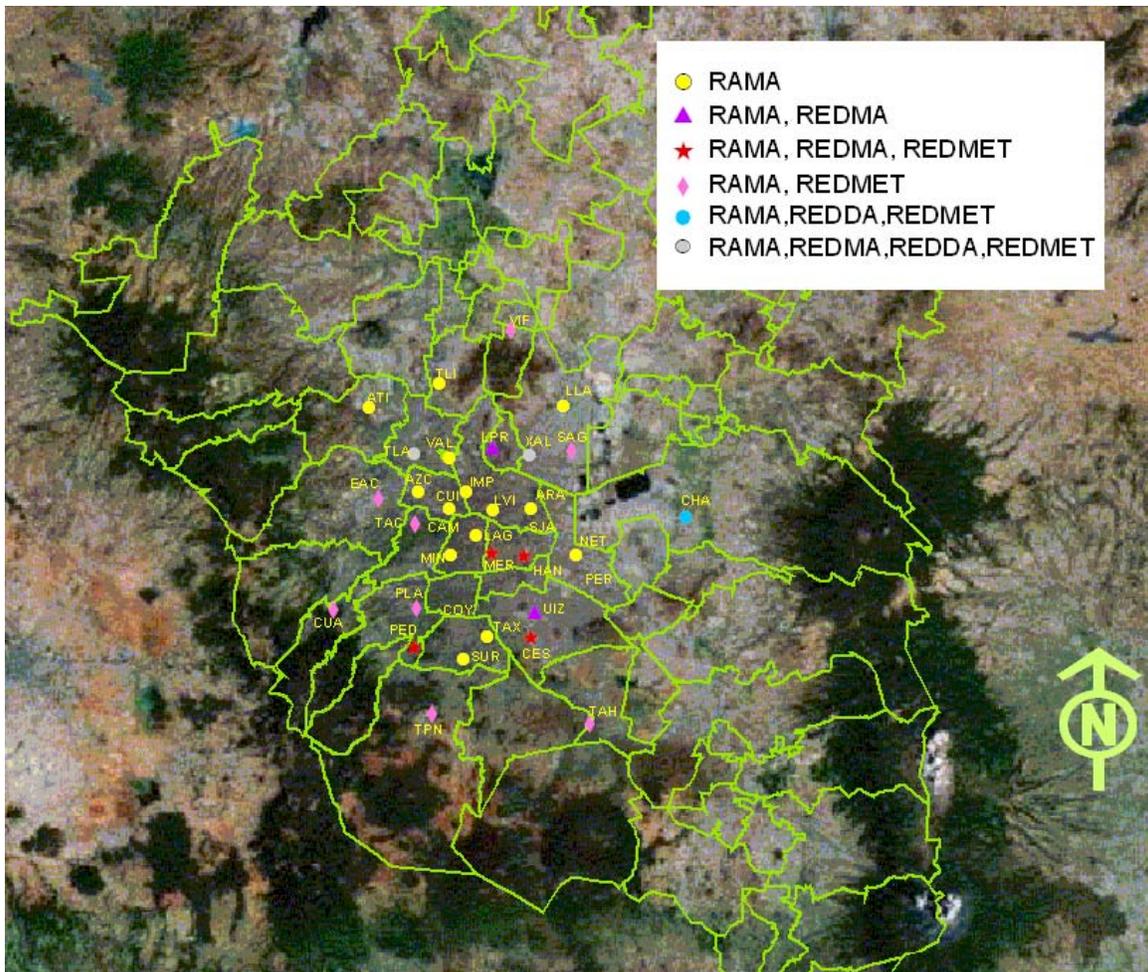
El SIMAT mantiene 49 estaciones de monitoreo, 36 ubicadas en el Distrito Federal y 13 en los municipios del Estado de México (Figura 2.1). Con base en las mediciones de las estaciones del SIMAT, se realiza el IMECA.

El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) es el medio para informar cada hora a la población de la ZMVM, qué tan limpio o contaminado se encuentra el aire. El IMECA se calcula para los contaminantes: O₃, SO₂, NO₂, CO, PM₁₀ y PM_{2.5}. Si el IMECA de un contaminante es mayor a 100 puntos significa que hay un riesgo de afectación a la salud.

El cálculo del IMECA se define en la Norma Técnica Ambiental del Distrito Federal NADF-009-AIRE, 2006. En ella se describe con valores, calificativos, colores y recomendaciones para hacerlo entendible a la población. Ver Tabla 2.1. (SMA-GDF, 2008d).

Tabla 2.1 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire

VALORES	CALIFICACIÓN	COLOR	RECOMENDACIONES
0 - 50	Buena		Adecuada para llevar a cabo actividades al aire libre.
51 - 100	Regular		Posibles molestias en niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma.
101 - 150	Mala		Causante de efectos adversos a la salud en la población, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma.
151 - 200	Muy Mala		Causante de mayores efectos adversos a la salud en la población en general, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma.
>200	Extremadamente Mala		Causante de efectos adversos a la salud de la población en general. Se pueden presentar complicaciones graves en los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma.



Fuente: Elaboración propia con datos del SIMAT

Figura 2.1 Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2009

Con base en las tendencias de la calidad del aire, la siguiente tabla presenta el número de días que se ha rebasado el IMECA por contaminante, desde el año 2000 al 2008 (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Número de días con valores del IMECA superiores a 100 puntos

		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
O₃	No de días	323	296	300	285	237	233	214	220	185
	Promedio de horas	4	4	4	3	2	2	2	2	2
NO₂	No de días	23	1	0	5	3	3	1	0	0
CO	No de días	2	0	0	0	0	0	0	0	0
SO₂	No de días	7	17	3	0	0	0	0	0	0
PM₁₀	No de días	45	49	19	56	16	17	36	35	75
PM_{2.5}	No de días	---	---	---	---	---	---	---	138	186

El IMECA de PM_{2.5} se comienza a calcular formalmente a partir del 2007

2.2 Gestión de la calidad del aire de la ZMVM

Las políticas orientadas a la prevención y control de la contaminación atmosférica deben ser construidas con base en un contexto que ubique el problema atmosférico en sus distintos niveles de existencia:

- como producto de características geográficas y naturales,
- como parte de una problemática ambiental con la que interactúa,
- como efecto de los patrones de uso del suelo, y de la estructura urbana
- como consecuencia de una tecnología y formas organizativas en el plano de las actividades económicas,
- como resultado de juegos de fuerzas económicas, sociales y políticas,
- como fenómeno influido por un orden urbano y un orden social en el cual coinciden un sistema de valores y un orden económico y político que le asigna sus verdaderos contenidos a la sociedad en su conjunto (MIT, 2004).

En este contexto y con el propósito de lograr una mejora continua de la calidad del aire en la ZMVM, es necesario que las acciones que se realicen formen parte de un esquema de gestión, buscando lograr la integración de las políticas de transporte, energía, salud y desarrollo urbano con las del ambiente, para lograr la reducción de las emisiones.

Asimismo, es básico contar con un sólido sistema de monitoreo de la calidad del aire y un inventario de emisiones actualizado que proporcionen los niveles de la contaminación local y las fuentes que la ocasionan, que permitan investigar y evaluar los grados de exposición a la contaminación y los efectos en la salud de la población.

El modelo de gestión de la calidad del aire de la ZMVM, inicia con el establecimiento de objetivos, siendo el principal el cumplimiento de las normas de calidad del aire para protección de la salud de la población, para lo cual se fijan metas en la reducción de las emisiones y de mejoras en la calidad del aire.

El segundo paso consiste en establecer políticas y programas para lograr dichos objetivos, en la Figura 2.2 se indican las políticas aplicadas en los años más recientes y su definición metropolitana a través del PROAIRE 2002-2010.

La tercera etapa se refiere a la instrumentación de las políticas y programas, para lo cual se establece una normatividad más estricta, los programas de inspección y vigilancia, el empleo de instrumentos económicos y programas específicos en cada sector que produce contaminantes del aire.

Por último, la cuarta fase del proceso es la de la evaluación de los resultados, en donde se analizan las tendencias de la calidad del aire, de las emisiones y de los efectos en la salud en la población, para conocer si se han logrado los objetivos planteados o si es necesario hacer adecuaciones en las políticas y programas de mejoramiento de la calidad del aire (SMA-GDF, 2006).



Fuente: Gestión Ambiental del Aire en el Distrito Federal. Avances y propuestas 2000-2006

Figura 2.2 Proceso de gestión de la calidad del aire de la ZMVM

Las características geográficas y climáticas de la ZMVM se consideran los principales factores que afectan el comportamiento de los contaminantes. Debido a que la ZMVM se localiza a una gran altitud, los procesos de combustión operan de manera incompleta y emiten una mayor cantidad de contaminantes a la atmósfera. Se ha demostrado que esta ineficiencia en la combustión, es consecuencia del bajo contenido de oxígeno del aire, el cual es aproximadamente 23% menor que al nivel del mar.

Además, su posición latitudinal ocasiona que reciba una radiación solar intensa que acelera la formación fotoquímica de contaminantes atmosféricos como el ozono y las partículas secundarias. Aunado a lo anterior, es importante tomar en cuenta la influencia de las condiciones meteorológicas, las cuales condicionan la acumulación y/o dispersión de contaminantes, ya que a pesar de los esfuerzos realizados para mejorar la calidad del aire en la ZMVM y de la disminución de ciertos contaminantes como el ozono y las partículas, aún no es posible cumplir con los límites que establecen las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental (NOM).

La problemática de la calidad del aire antes descrita, no se rige por límites administrativos, por lo cual, la atención a problemas comunes en la ZMVM, se realiza por medio de la Comisión Ambiental Metropolitana (CAM), a través de la creación de programas metropolitanos.

Los programas para mejorar la calidad del aire, constituyen uno de los instrumentos esenciales para revertir las tendencias de deterioro, en ellos se incorporan medidas concretas para disminuir emisiones contaminantes y se basan en la relación existente entre la emisión y la fuente que la genera, así como en los impactos que ocasionan en la calidad del aire y en la salud de la población. Cabe mencionar que los inventarios de emisiones, es uno de los fundamentos de estos programas.

Como antecedente de dichos programas podemos citar al Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica (PICCA, 1990) y los Programas para Mejorar la Calidad del Aire del Valle de México: PROAIRE I 1995-2000 y actualmente el PROAIRE II 2002-2010.

El *Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002–2010* (PROAIRE II 2002-2010), conjunta los esfuerzos del Gobierno Federal, del Gobierno del Distrito Federal y del Gobierno del Estado de México, en el marco de la Comisión Ambiental Metropolitana.

En el PROAIRE II se incluyen medidas diseñadas para reducir las emisiones a través de la modernización y mejoramiento del transporte, regulación ambiental del crecimiento urbano, producción más limpia de bienes y servicios, modernización tecnológica y control de emisiones, así como la preservación, restauración y conservación de recursos naturales. Además, se establecen una serie de medidas por sector, las cuales pretenden disminuir la emisión los principales contaminantes en la ZMVM (Tabla 2.3).

Tabla 2.3 Medidas de reducción de emisiones del PROAIRE 2002-2010

Grupo de trabajo	Total de medidas
Industria y Servicios	15
Recursos Naturales	15
Control vehicular	9
Educación Ambiental	4
Transporte	23
Normatividad	6
Energía	6
Salud	7
Investigación	3
Financiamiento	1
Total	89

Fuente: CAM, 2002. PROAIRE II.

En particular, el Gobierno del Distrito Federal lleva a cabo la instrumentación del *Plan Verde*, el cual pretende encaminar a la Ciudad hacia la sustentabilidad.

Uno de sus principales objetivos del *Plan Verde* es reducir la concentración ambiental del ozono y de las partículas, debido a que son los contaminantes atmosféricos de mayor afectación a la salud, y que varias veces al año rebasan su norma respectiva. Sin embargo, además de estos contaminantes, también se proponen acciones que tiendan a reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero.

El *Plan Verde*, además de otras acciones, promueve el transporte público masivo, eficiente, moderno y limpio. Para cumplir con lo anterior, es importante considerar que se están llevando a cabo una gran cantidad de obras de construcción de vialidades y, por lo tanto, es y será por un tiempo, una actividad generadora de contaminantes y con potencial de ser incluida en las evaluaciones de los inventarios de emisiones.

Como resultado del *Plan Verde*, al reducir las concentraciones actuales de PM₁₀ hasta cumplir con la norma de protección a la salud, se evitarían más de 2 mil casos de admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias y cardiocerebrovasculares, más de 26 mil visitas a la sala de emergencias por padecimientos respiratorios, la pérdida de productividad debidos a más de 9 millones de días de actividad restringida en adultos, la pérdida de productividad debida a más de 940 mil días laborales destinados por las mujeres a la atención de los niños enfermos (SMA-DGF, 2007b).

Para reducir la contaminación del aire, en el *Plan Verde* se cuenta con las siguientes medidas (Figura 2.3):



Aire

Acciones y Metas para lograr nuestro objetivo

E1 Reducción de las emisiones de contaminantes

- Reducción en un 50% de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles precursores del ozono para el 2012
- Reducción en por lo menos 80% de las emisiones de partículas suspendidas menores a 10 micrómetros para el 2012
- Reducción de 10 mil toneladas anuales de contaminantes provenientes de la industria para el 2012
- Impulsar la verificación vehicular obligatoria al transporte de carga para el 2009
- Sustitución en un 100% del parque vehicular del Gobierno de la Ciudad por unidades energéticamente eficientes y de baja contaminación para el 2012

Figura 2.3 Acciones de mitigación en materia de aire-Plan Verde del D.F.

México no está incluido en el *Anexo 1* del Protocolo de Kioto por ser considerado país en vía de desarrollo; por lo tanto, no está obligado a disminuir sus emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, convino en la realización de inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero.

Asimismo, ha decidido poner en marcha ciertas medidas orientadas a mitigar la emisión de dichos gases. Conjuntamente con la promoción y el apoyo a la transferencia de tecnologías, prácticas y procesos que controlen, reduzcan o prevengan las emisiones de GEI; promoción de la educación, capacitación y la sensibilización del público respecto del cambio climático.

Con base en lo anterior, en el marco de la *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC por sus siglas en inglés) y bajo las directrices establecidas por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), el Gobierno del Distrito Federal ha desarrollado su “Estrategia Local de Acción Climática” (ELAC), en la cual se plantean acciones para la mitigación de gases de efecto invernadero.

La ELAC establece acciones específicas para el ahorro y uso eficiente de los recursos naturales, de la regulación y el uso eficiente de equipos, de la sustitución de combustibles y de la promoción de combustibles alternos, de la utilización de nuevas tecnologías y fuentes renovables de energía, así como del desarrollo de acciones en el sector forestal para la captura de carbono y la conservación de los reservorios (GDF-SMA, 2006a).

Como respuesta a su compromiso de implementar una política de reducción y captura de los gases de efecto invernadero, así como de adaptación a los impactos del cambio climático, la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Distrito Federal, elaboró su “Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2008-2012”. Este Programa identifica los elementos básicos que se requieren para la instrumentación de acciones y actividades, para reducir los riesgos y los efectos del cambio climático.

Además, se incluyen medidas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en las actividades controladas y reguladas por el GDF y de adaptación a las condiciones y efectos presentes y anticipados del cambio climático (GDF-SMA, 2008e).

2.3 Principales contaminantes atmosféricos en la ZMVM

El aire contaminado produce diferentes daños a la salud humana, dependiendo de las propiedades físicas y químicas de sus componentes. La susceptibilidad a la exposición de contaminantes del aire varía de persona a persona. El riesgo individual está determinado por el estado de nutrición, las condiciones respiratorias y cardíacas, y el uso de medicamentos (SMA-GDF, 2006).

La acumulación y dispersión de contaminantes, no solo afecta la salud humana y a los ecosistemas a escala local y regional, sino que también influye en la calidad del aire y el clima de la tierra. Los parámetros climáticos como la temperatura y la humedad, pueden afectar la transformación química, el transporte y el depósito de los contaminantes. Por ejemplo, incrementos de temperatura aceleran la formación de ozono y el aumento del vapor atmosférico, afecta la producción y destrucción del mismo (Molina y Molina, 2002).

Derivado de que la gestión de la calidad de aire tiene como objetivo proteger la salud de la población de ZMVM, a continuación se presenta una breve descripción de los principales contaminantes atmosféricos y sus efectos a la salud, asimismo, en algunos casos se muestra el cumplimiento a su respectiva norma de salud (Tabla 2.4).

Tabla 2.4 Cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental

Contaminante		Cumplimiento de la NOM en la ZMVM	Exposición aguda (frecuencia aceptable)	Valor máx., exposición aguda ¹³	Días con excedencia (exposición aguda)	Exposición crónica	Valor máx. anual de exposición crónica ¹⁴
Monóxido de carbono (CO) ¹⁵		Sí	11 ppm prom. 8 hr. (una vez al año)	4.5 ppm	0	---	---
Dióxido de nitrógeno (NO ₂) ¹⁶		Sí	0.21 ppm prom. 1 hr. (una vez al año)	0.187 ppm	0	---	---
Dióxido de azufre (SO ₂) ¹⁷		Sí	0.13 ppm prom. 24 hr (una vez al año)	0.082 ppm	0	0.03 ppm promedio anual	0.011 ppm
Partículas ¹⁸	Suspendidas totales (PST)	No	210 µg/m ³ percentil 98 anual	314 µg/m ³	---	---	---
	<10 µm (PM ₁₀)	No	120 µg/m ³ percentil 98 anual	131 µg/m ³	---	50 µg/m ³ promedio anual	70 µg/m ³
	<2.5 µm (PM _{2.5})	No	65 µg/m ³ percentil 98 anual	52 µg/m ³	---	15 µg/m ³ promedio anual	26 µg/m ³

Fuente: Informe de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México: Estado y Tendencias 1990 – 2007

2.3.1 Partículas

El origen de las partículas en suspensión es variado (industrial, natural, doméstico, combustión, entre otros), por lo que puede tener componentes orgánicos e inorgánicos. Sus características físicas y tamaño también son variados y entre más pequeño es el diámetro de las partículas, mayor es su afectación a la salud por la retención en las vías respiratorias.

¹³ Se obtienen de la siguiente forma: O₃ promedio de 1 hora, máximo anual de promedios de una hora y O₃ promedio de 8 horas, quinto máximo anual de promedios móviles de 8 horas; CO, máximo anual de promedios móviles de 8 horas; SO₂, máximo anual de promedios de 24 horas; PM₁₀ y PM_{2.5}, percentil 98 de promedios de 24 horas; NO₂, máximo anual de promedios de una hora.

¹⁴ Se obtienen de la siguiente forma: SO₂, PST, PM₁₀ y PM_{2.5}, promedio aritmético anual; Pb, promedio aritmético trimestral.

¹⁵ NOM-021-SSA1-1993, publicada en el DOF el 23 de diciembre de 1994.

¹⁶ NOM-022-SSA1-1993, publicada en el DOF el 23 de diciembre de 1994.

¹⁷ NOM-023-SSA1-1993, publicada en el DOF el 23 de diciembre de 1994.

¹⁸ Modificación a la NOM-025-SSA1-1993, publicada en el DOF el 26 de septiembre de 2005.

Las PM_{10} son generadas básicamente por la agricultura, minería y tráfico vehicular, mientras que las $PM_{2.5}$, se deben principalmente a la combustión o se forman como contaminante secundario, por la condensación de otros gases (Molina y Molina, 2002).

Las PM_{10} se depositan principalmente en la tráquea, mientras que las $PM_{2.5}$ se alojan en los pulmones, bronquios y alveolos. En niños se ha observado anemia, disminución de la hemoglobina y glóbulos rojos, proporcional a la cantidad de polvo en suspensión (IEM, 2008). En general afectan los pulmones, ocasionando cambios en el mecanismo respiratorio, incrementan las reacciones químicas en la atmósfera, reducen la visibilidad y aumentan la posibilidad de precipitación, niebla y nubes; además, reducen la radiación solar, ocasionando cambios de temperatura (Sbarato, 2000).

De acuerdo con las tendencias de la calidad del aire, el ozono y las partículas suspendidas se mantienen como los contaminantes que representan mayor riesgo para la salud, por rebasar sus respectivas normas ambientales. Además, cabe mencionar que desde 2004, las concentraciones de $PM_{2.5}$ se encuentran por encima de los valores de norma. La Tabla 2.5 muestra los límites de emisión que deben cumplirse para las partículas.

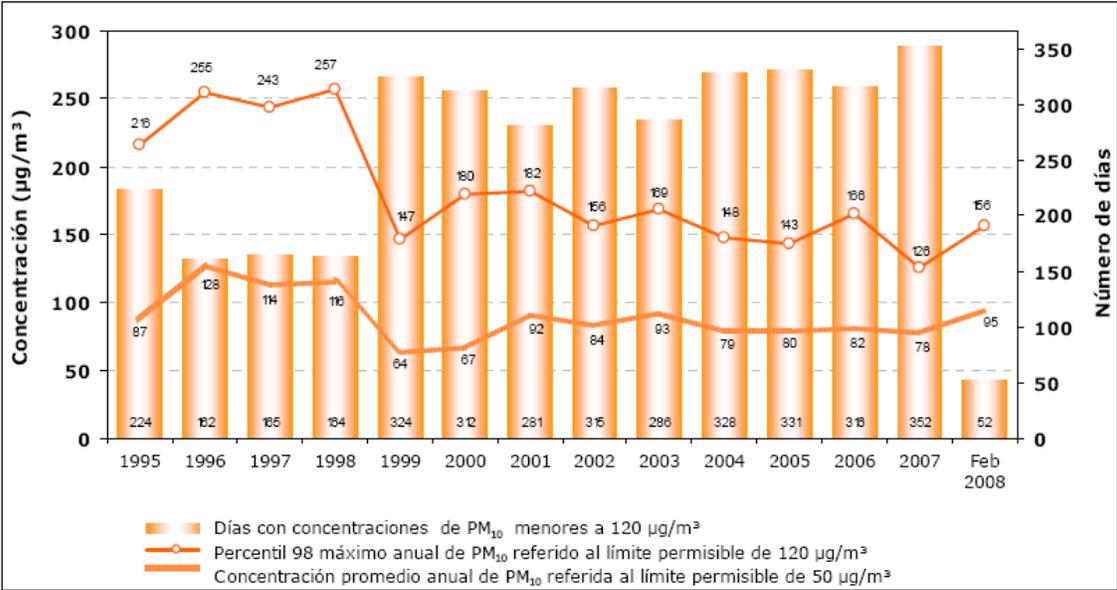
Tabla 2.5 Límites para partículas en suspensión

Contaminante	Norma Oficial Mexicana (NOM)	Límite permisible
PST	Modificación a la NOM-025-SSA1-1993	<ul style="list-style-type: none"> • 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. No debe rebasar este límite en 24 horas, en un periodo de un año. (<i>NOM-024-SSA1-1993, vigente hasta el 26 de septiembre de 2005</i>) • 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas. Percentil 98 de los valores promedios diarios • 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual (<i>NOM-024-SSA1-1993, vigente hasta el 26 de septiembre de 2005</i>).
PM_{10}		<ul style="list-style-type: none"> • 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. No debe rebasar este límite en 24 horas, en un periodo de un año. (<i>NOM-025-SSA1-1993, vigente hasta el 26 de septiembre de 2005</i>). • 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas. Percentil 98 de los valores promedios diarios • 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual.
$PM_{2.5}$		<ul style="list-style-type: none"> • 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas. Percentil 98 de los valores promedios diarios. • 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual.

Fuente: NOM-025-SSA1-1993

En el caso de las PM_{10} , el número de días con una calidad del aire aceptable se ha incrementado de 162 en el año 1996 a 352 en el año 2007; no obstante, el promedio anual para exposición crónica de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aun se mantiene por encima del valor de la NOM- PM_{10} , sin embargo, ha disminuido de $257 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 1998 a $78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el año 2007. Es importante mencionar que en el año 2008, todas las estaciones ubicadas en el Estado de México excedieron el valor de norma.

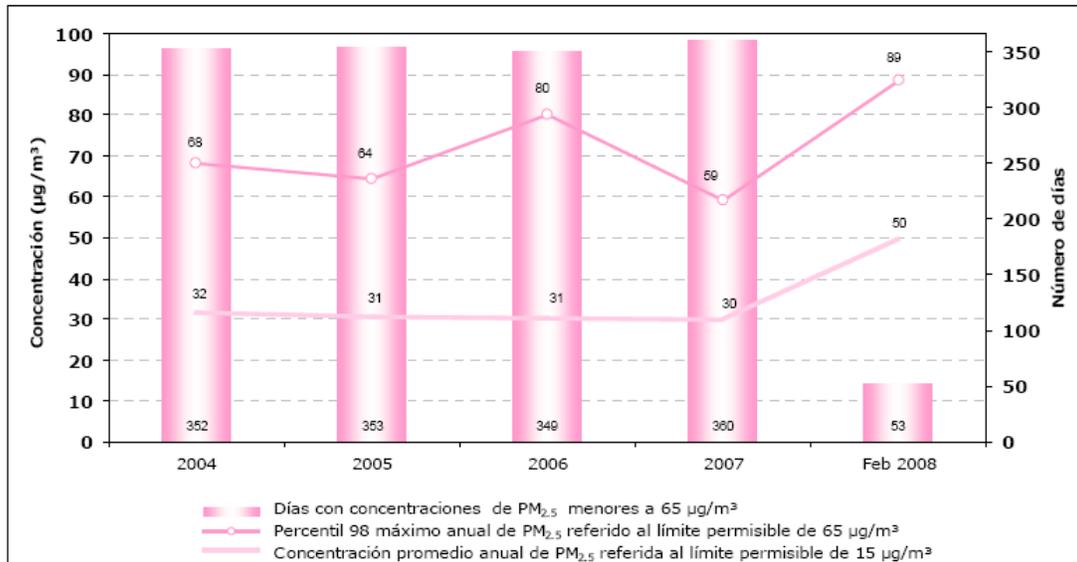
Es necesario mencionar que las variaciones anuales que muestra este contaminante son debidas en gran medida a las condiciones meteorológicas de la ZMVM. La Figura 2.4 presenta el comportamiento anual de las PM_{10} , que según los análisis de tendencias de calidad del aire, desde 1990 es homogénea y decreciente.



Fuente: Seis medidas metropolitanas de la calidad del aire.

Figura 2.4 Comportamiento anual de la concentración de PM_{10}

Referente a las partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), se tiene que el número de días con una calidad del aire aceptable se ha incrementado de 352 en el año 2004 a 360 en el año 2006; sin embargo, el promedio anual para exposición crónica de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aún se mantiene por encima del valor de la NOM- $PM_{2.5}$. (Figura 2.5).



Fuente: Seis medidas metropolitanas de la calidad del aire.

Figura 2.5 Comportamiento anual de la concentración de PM_{2.5}

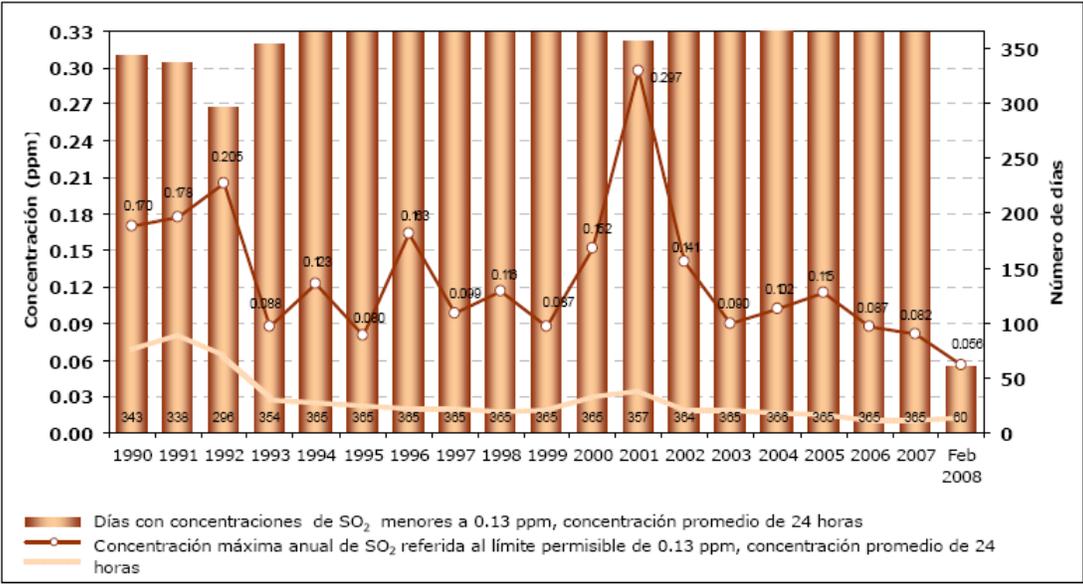
Durante el año 2008, en ningún sitio de la Ciudad se reportaron valores superiores al límite recomendado por la NOM para el indicador de 24 horas ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Sin embargo, en todas las estaciones se excedió el valor del promedio anual de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (SMA-GDF, 2009).

2.3.2 Bióxido de azufre (SO₂)

La quema de combustibles fósiles generan grandes cantidades de SO₂ y su concentración se agudiza en zonas industriales y urbanas; el problema empeora cuando se transforma en trióxido de azufre (SO₃), pues al diluirse en el vapor de agua genera ácido sulfúrico (H₂SO₄), que es componente de la lluvia ácida. Es un gas incoloro, no inflamable y de olor irritante (IEM, 2008).

Entre sus efectos nocivos a la salud se pueden mencionar: problemas de bronquitis crónica y del sistema respiratorio superior (fosas nasales, tráquea, faringe), ya que al ser soluble en agua se convierten en ácido y queda retenido en las mucosas. Supresión del sistema inmunológico y bronquitis. Entre los efectos agudos: irritación y respiración entrecortada (Molina y Molina, 2002).

La tendencia de las concentraciones de SO₂ desde el año 1990 presenta un comportamiento irregular (Figura 2.6), sin embargo, en 16 estaciones de monitoreo, su tendencia es homogénea y decreciente (SMA-GDF, 2008d). Desde 1994 no se ha rebasado la NOM-SO₂, con excepción del 2001 cuando se rebasó el valor promedio de la norma en 8 días (SMA-GDF, 2008a).



Fuente: Seis medidas metropolitanas de la calidad del aire.

Figura 2.6 Comportamiento anual de la concentración de SO₂

En el año 2008 no se reportaron valores por arriba de los límites de norma y, aún cuando se observó el cumplimiento en las estaciones localizadas en la región norte de la ZMVM, se registraron eventos de corta duración caracterizados por altas concentraciones de dióxido de azufre (SMA-GDF, 2009).

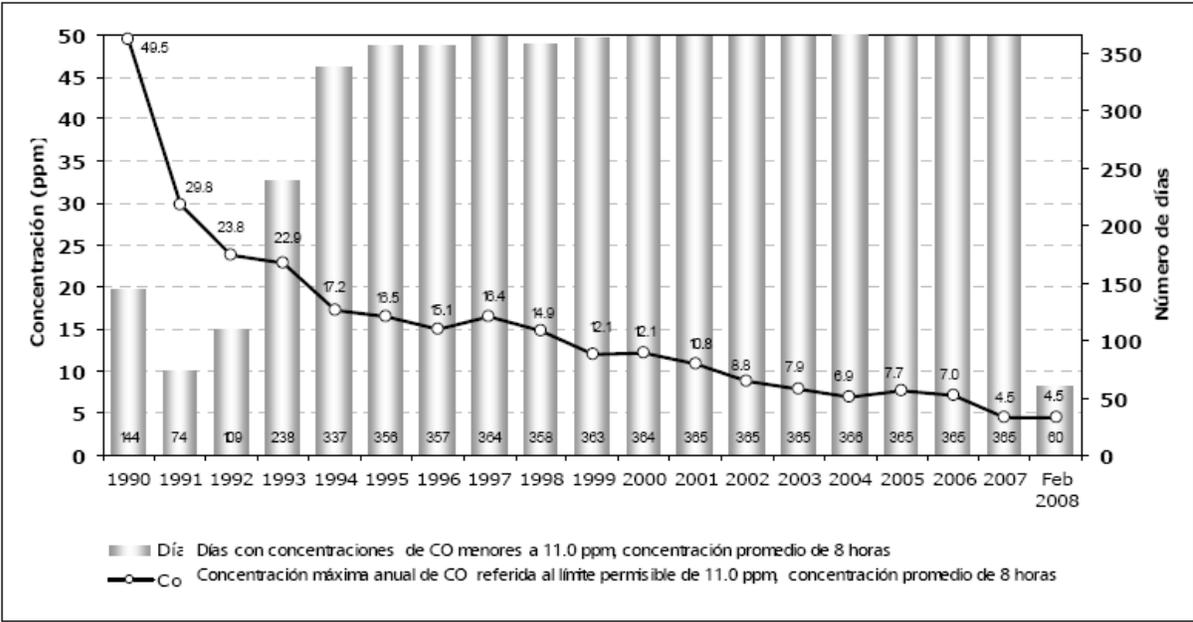
2.3.3 Monóxido de carbono (CO)

Es subproducto de la combustión incompleta de hidrocarburos y su fuente principal son los vehículos automotores, es por esto que las concentraciones máximas de este contaminante se registran en estaciones con notable influencia del tránsito vehicular.

Es un gas incoloro, inodoro e insípido, tóxico e insoluble. Afecta al sistema respiratorio interno, debido a que es retenido en los alveolos; se combina con la hemoglobina de la sangre sustituyendo al oxígeno; puede provocar muerte cerebral al no llegar oxígeno a las neuronas, así como provocar dificultades en la coagulación y aumento de la frecuencia cardiaca (IEM, 2008).

El CO es más peligroso en altas elevaciones, donde la presión parcial del oxígeno es más baja y donde ya la gente puede padecer de una inadecuada oxigenación (Molina y Molina, 2002). Con base en la tendencia de la concentración ambiental del CO en el aire (Figura 2.7), se observa que éste contaminante ha disminuido gradualmente desde 1990.

En las 15 estaciones de monitoreo, el patrón de tendencia durante 2007 fue homogéneo y decreciente (SMA-GDF, 2008a y 2008d). La concentración promedio anual ha pasado de 49.5 ppm a 4.5 ppm, y desde 2001 no se ha rebasado el valor establecido por la NOM-CO (11 ppm promedio de 8 horas).



Fuente: Seis medidas metropolitanas de la calidad del aire.

Figura 2.7 Comportamiento anual de la concentración del CO

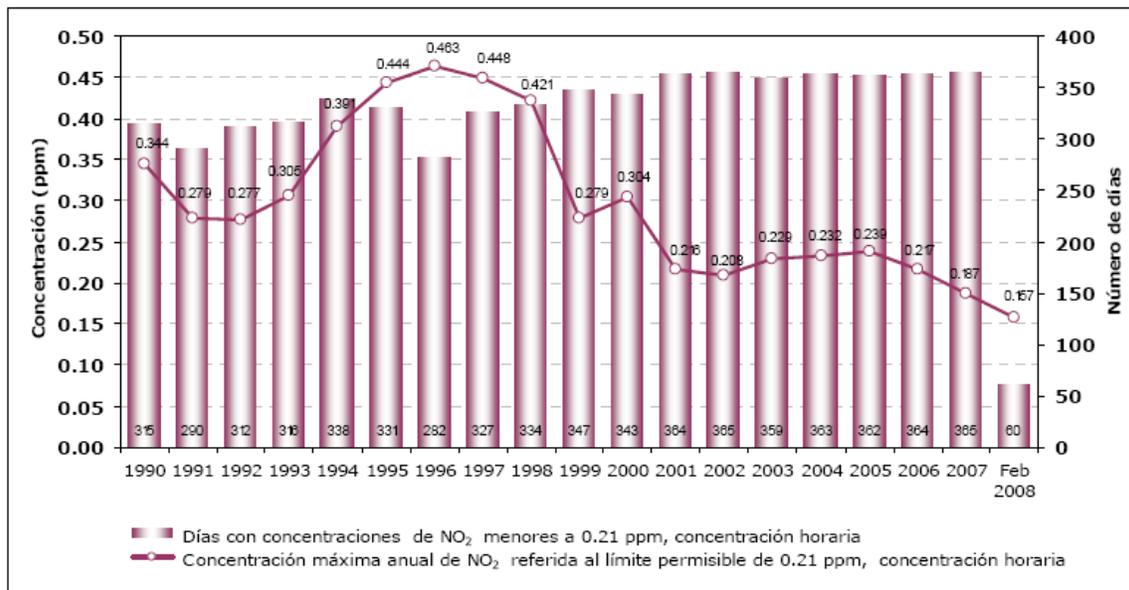
2.3.4 Óxidos de nitrógeno (NOx)

Los óxidos de nitrógeno se encuentran en la atmósfera de manera natural, generados por fenómenos como erupciones y tormentas; sin embargo, su fuente principal es la combustión vehicular y las plantas generadoras de energía eléctrica. Los más importantes en la contaminación del aire son, el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂). El primero es un gas incoloro e inodoro, lo contrario del NO₂, que además es corrosivo en materiales y tóxico en humanos.

Entre los efectos agudos se puede mencionar: el daño en la membrana celular del tejido de pulmones que afecta vías respiratorias, bronquitis crónica y otros efectos secundarios como la percepción olfativa, molestias respiratorias y dolor, así como edema de pulmón, necrosis y muerte celular (Sbarato, 2000; Molina y Molina, 2002).

Los NOx deben ser controlados debido a que son precursores del ozono troposférico. En la ZMVM, se ha detectado que gran parte del dióxido de nitrógeno es de origen fotoquímico, es decir, se forma por reacciones del óxido nítrico y compuestos oxidantes, como lo es el ozono y el radical hidroxilo (Shirley *et al.*, 2006).

El patrón general de las concentraciones atmosféricas de los NO₂ es irregular y sin tendencia (Figura 2.8). Entre los años de 1990 y 2000 se registraron 483 días por encima de la NOM-NO₂, en el periodo comprendido del año 2001 al año 2007, sólo se reportan 14 días con excedencia a la norma (SMA-GDF, 2008a y 2008d).



Fuente: Seis medidas metropolitanas de la calidad del aire.

Figura 2.8 Comportamiento anual de la concentración del NO₂

2.3.5 Compuestos orgánicos volátiles (COV)

La presencia en la atmósfera de hidrocarburos ligeros no es normal y provienen básicamente de la combustión incompleta de la gasolina (IEM, 2008). Sin embargo, su origen también es natural, pues algunos compuestos son generados por la vegetación. Los COV son precursores del ozono y otros oxidantes, entre ellos se encuentran algunas especies tóxicas (benceno, formaldehído y el 1,3 butadieno, entre otros), los cuales son considerados carcinogénicos. Algunos otros provocan somnolencia, irritación ocular y cefaleas (Sbarato, 2000).

2.3.6 Gases efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) son gases integrantes de la atmósfera, de origen natural y antropogénico, absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de radiación infrarroja, emitido por la superficie de la tierra, la atmósfera y las nubes. Esta propiedad causa el efecto invernadero. Los gases de efecto invernadero atrapan el calor dentro de la capa terrestre denominada troposfera; a esto se le denomina '*efecto invernadero natural*' (IPCC, 2001b).

El vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) y en ocasiones el ozono (O₃), son los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre (IPCC, 2001a). Conjuntamente existen en la atmósfera una serie de gases de efecto invernadero producidos por el hombre, como son los halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro y bromuro, de las que se ocupa el Protocolo de Montreal. Además del CO₂, N₂O y CH₄, el Protocolo de Kyoto incluye otros gases de efecto invernadero, como son el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC), y los perfluorocarbonos (PFC).

Según los Informes de Evaluación del Panel Intergubernamental Sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), de continuar con el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero al ritmo actual, la temperatura de la atmósfera podría incrementarse entre 1.4°C y 5.8°C durante éste siglo (IPCC, 2001a).

La importancia de los GEI radica en que el incremento en la atmósfera de dichos gases, puede cambiar el balance radiativo de la tierra y la temperatura media global. En condiciones de equilibrio, estos gases mantienen una temperatura media global de 14-15°C, lo que hace posible la existencia de la vida en la tierra. Sin embargo, el aumento de sus concentraciones, derivado de las actividades humanas, ha rebasado la capacidad de los ecosistemas para absorberlos (IPCC, 2001a).

Entre las principales actividades antropogénicas que afectan dicho equilibrio se pueden mencionar las siguientes: quema de combustibles fósiles para producción de energía, la deforestación y los cambios en el uso de las tierras.

El dióxido de carbono (CO₂) se encuentra en elevada proporción de forma natural en la atmósfera y está relacionado directamente con la radiación que proviene de la superficie de la tierra, su importancia por lo tanto, radica en el calentamiento que ha venido experimentando el planeta en los últimos años.

De los gases de efecto invernadero, el CO₂ es el gas antropogénico más importante por sus emisiones anuales, las cuales han aumentado en un 80% del año 1970 al 2004, pasando de 21 a 38 gigatoneladas (Gt); siendo la fuente principal de CO₂, la combustión de cualquier compuesto orgánico (IPCC, 2007). Además, se menciona que durante los últimos diez años, el crecimiento ha sido mucho más elevado (0.92 Gt CO₂-eq anual, 1995-2004), que en periodos pasados (0.43 GtCO₂-eq anual, 1970-1994), como consecuencia de las actividades humanas.

El CO₂ es el gas de referencia con el cual son medidos otros gases de efecto invernadero y su potencial de calentamiento global¹⁹ es igual a uno (IPCC, 2001b).

El metano (CH₄) es uno de los GEI a ser mitigados bajo el protocolo de Kyoto y es el generado principalmente por el gas natural, la ganadería y la agricultura. El CO₂ y el CH₄ no tienen efectos directos a la salud humana, pero se consideran gases efecto invernadero, los cuales propician el calentamiento global.

En la ZMVM, el metano es originado básicamente por la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas (basura), y en menor proporción por la combustión de combustibles fósiles. Al igual que el CO₂, sus concentraciones aumentan principalmente por la acción antropogénica directa e indirecta.

El óxido nitroso (N₂O) es químicamente estable y no tiene efectos en la salud humana, sin embargo, su importancia radica en que es un gas de efecto invernadero. Es generado en los procesos antropogénicos que incluyen la combustión del gas natural en las industrias manufactureras y de generación de energía eléctrica, así como por la incineración de gasolina y diesel en los motores de combustión interna, además del uso de fertilizantes petroquímicos.

La principal fuente antropogénica del N₂O es la agricultura, pero también es generado por el ganado, tratamiento de aguas residuales e industria química. De

¹⁹ Define el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo, que produce una liberación instantánea (hoy) de 1 kg de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por el CO₂. Se consideran los efectos radiactivos de cada gas, así como sus diferentes tiempos de permanencia en la atmósfera. Nos revela en qué medida el efecto invernadero causado por este gas, supera el efecto del CO₂.

forma natural es producido por fuentes biológicas en suelo y agua, básicamente por acción microbiana en bosques tropicales (IPCC, 2007).

En general, los gases de efecto invernadero, tendrán efectos indirectos en la salud, debido al incremento de la malnutrición, de las enfermedades del aparato digestivo, enfermedades debidas a eventos climáticos extremos, aumento en la frecuencia de enfermedades cardio-respiratorias, así como la alteración de la distribución espacial de algunas enfermedades infecciosas (IPCC, 2007).

El incremento de los GEI está provocando un cambio climático, es decir, una variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad. El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios antropogénicos.

La UNFCCC en su Artículo 1, define '*cambio climático*' como: 'un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables'. Además, distingue entre 'cambio climático' atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y 'variabilidad climática' atribuida a causas naturales (UNFCCC, 1992).

Como consecuencia del cambio climático en sistemas humanos y naturales, y según la medida de la adaptación, se pueden distinguir impactos potenciales y residuales. Los impactos potenciales son aquellos que pueden suceder dado un cambio proyectado en el clima, sin tener en cuenta las medidas de adaptación. Los impactos residuales, son los impactos del cambio climático que pueden ocurrir después de la adaptación (IPCC, 2001b). Conjuntamente con los impactos anteriores, es importante destacar que se han definido impactos a la economía, es decir a las transacciones comerciales que afectan directamente al producto interno bruto de ciertas regiones.

Capítulo 3 Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM, 2008

Los inventarios de emisiones de la ZMVM, se realizan de forma bianual e incluyen las emisiones por tipo de fuente, categoría y subsector. Los inventarios permiten identificar los sectores de mayor contribución por tipo de contaminante, pudiendo así, aplicar medidas de control y/o reducción de emisiones, dirigidas a quién más contamina y en forma localizada, toda vez que los inventarios presentan una distribución espacial de las emisiones.

A continuación se presenta el inventario de emisiones de la ZMVM, 2008 (SMA-GDF, 2010a), así como una breve descripción de los sectores más emisores por tipo de contaminante (Tabla 3.1 y Figura 3.1).

Tabla 3.1 Inventario de emisiones anuales de la ZMVM, 2008

Sector	Emisiones															
	PM ₁₀		PM _{2.5}		SO ₂		CO		NOx		COT		COV		NH ₃	
	ton/año	%	ton/año	%	ton/año	%	ton/año	%	ton/año	%	ton/año	%	ton/año	%	ton/año	%
Fuentes puntuales	4,986	20.5	859	15.6	3,375	50.3	6,961	0.4	20,094	10.7	134,201	14.2	129,178	21.8	181	0.9
Fuentes de área	14,678	60.4	1,643	29.9	23	0.3	9,263	0.6	12,043	6.4	581,729	61.4	241,252	40.8	15,198	75.3
Fuentes móviles	3,902	16.1	2,849	51.8	3,306	49.3	1,552,204	99.0	154,919	82.4	195,218	20.6	185,384	31.3	4,798	23.8
Fuentes naturales	730	3.0	148	2.7	N/A	N/A	N/A	N/A	1,031	0.5	35,585	3.8	35,585	6.0	N/A	N/A
Total	24,296	100	5,499	100	6,704	100	1,568,428	100	188,087	100	946,733	100	591,399	100	20,177	100

N/A: No Aplica

En la tabla anterior se puede observar que el CO es el mayor contaminante, con una emisión de 1.56 millones de toneladas al año y es generado en su mayoría por las fuentes móviles; le sigue en importancia los COV con más de 591 mil toneladas, teniendo a las fuentes de área como las más generadoras (41%). Los NOx se estimaron en aproximadamente 188 mil toneladas anuales y cabe mencionar que el 82% es generado por las fuentes móviles.

Con respecto a las PM₁₀, se emitieron a la atmósfera más de 24 mil toneladas al año, de las cuales, el 47% es generado por las vialidades no pavimentadas. De las emisiones de PM₁₀, el 27% corresponden a PM_{2.5} (Figura 3.1).

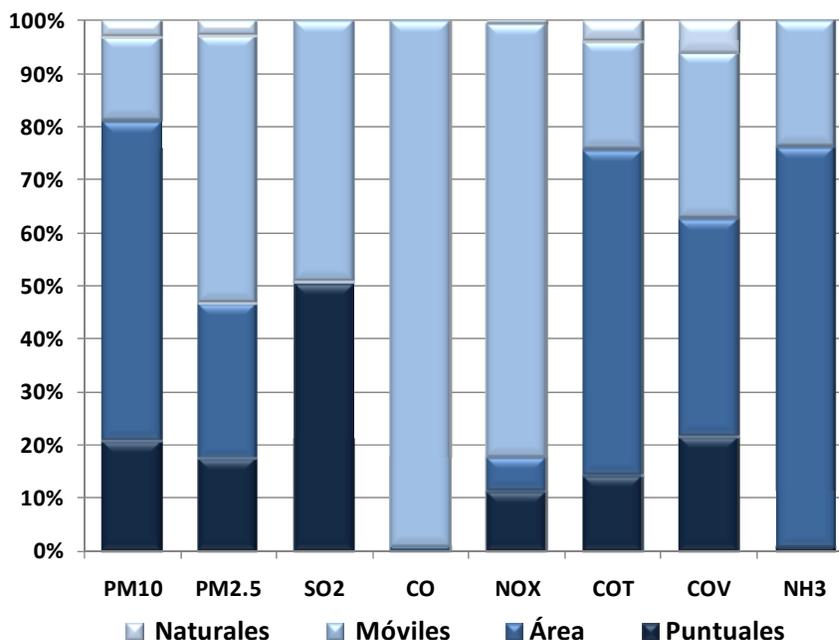


Figura 3.1 Contribución de emisiones por tipo de fuente y contaminante, 2008

La Tabla 3.2 presenta el inventario de emisiones desagregado por categoría de emisión y la Tabla 3.3, el inventario porcentual por categoría. Los autos particulares son una de las categorías más contaminantes y generan el 41% del CO, el 32% de NOx y el 25% de SO₂; otra emisión importante en las fuentes móviles son los vehículos a diesel (tractocamiones, mayores a 3 toneladas y autobuses), los cuales en conjunto aportan el 36% de las PM_{2.5} y el 23% de NOx.

Las fuentes puntuales generan el 50% del SO₂, con el sector de productos minerales no metálicos como el más contaminante, éste contribuye con el 17% al total de SO₂ y le sigue en importancia de emisión, el sector de sustancia químicas con el 13% de SO₂ de la ZMVM.

Los COV son los principales contaminantes generados por las fuentes de área y éstas, en conjunto, representan el 41% del total de COV de la ZMVM. Según estudios realizados durante 2005 y 2006 con la campaña MILAGRO, realizada por el Centro Mario Molina, se determinó que los compuestos de mayor abundancia en la atmósfera son las parafinas, los aromáticos y las olefinas, además, se presenta una mezcla de alquinos, compuestos halogenados y especies oxigenadas (INE-SEMARNAT, 2006 y Velasco, E., Márquez C. *et al*, 2007).

Según la desagregación por especie química de los COT del Inventario de Emisiones 2008, los compuestos más abundantes al igual que en los monitoreos atmosféricos, incluyen: parafinas (49%), hidrocarburos oxigenados (12%) compuestos aromáticos (11%), y olefinas (8%) (SMA-GDF, 2010a).

Es importante aclarar que la especiación de COV y/o COT es de gran importancia, debido a que los índices de reactividad atmosférica para la formación de ozono varían para cada compuesto. Por lo tanto, aunque las emisiones de las parafinas son las más abundantes, los índices de reactividad de las especies que integran esta familia son bajos, comparados con los índices de los aromáticos y de las olefinas.

La generación de partículas en la ZMVM se debe principalmente al tránsito vehicular por vialidades sin pavimentar, sector que forma parte de las fuentes de área y aportan el 47% de las PM_{10} . Le siguen en emisión las fuentes puntuales, que en conjunto aportan el 21% y las fuentes móviles con el 16%, dentro de éstas, los tractocamiones contribuyen con el 6%. Con respecto a las $PM_{2.5}$, los vehículos de carga pesados son los más emisores, debido al uso de diesel como combustible. En conjunto, las fuentes móviles generan el 51% de las $PM_{2.5}$ de la ZMVM.

Según en estudios atmosféricos de 1997 y del año 2000 de la ZMVM²⁰, han encontrado que del 37% al 50% de las PM_{10} son de origen geológico, en el inventario de emisiones 2008, el 61% de las PM_{10} fueron de origen geológico de (incluye vialidades pavimentadas, no pavimentadas y erosión eólica).

Con base en lo anterior, se puede considerar que la emisión de partículas generadas por actividad de la construcción, puede ser un sector importante de contribución a las emisiones de PM_{10} de la ZMVM y además, es un sector que no es incluido en de los inventarios de emisiones.

²⁰ Análisis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the Atmosphere of México City during 2000-2002 y Chemical Composition of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in México City during 2000-2002 winter 1997.

Tabla 3.2 Inventario de emisiones desagregado de la ZMVM, 2008

Sector	Emisiones [ton /año]					
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO _x	COV
Fuentes puntuales	4,986	859	3,375	6,961	20,094	129,178
Productos alimenticios, bebidas y tabaco	869	72	136	433	1,414	7,432
Textiles, prendas de vestir e industria del cuero	466	32	145	134	350	11,845
Industria de la madera y productos de madera	111	9	148	11	33	1,745
Papel y productos de papel, imprenta y editoriales	139	75	513	475	1,221	23,035
Sustancias químicas, productos derivados del petróleo y del carbón, de hule y de plástico	784	91	843	661	1,515	64,149
Productos minerales no metálicos	1,414	282	1,109	942	1,601	1,315
Industrias metálicas básicas	155	26	212	596	1,876	2,080
Productos metálicos, maquinaria y equipo	824	71	210	1,511	991	15,940
Otras industrias manufactureras	27	4	44	20	118	1,495
Generación de energía eléctrica	197	197	15	2,178	10,975	142
Fuentes de área	14,678	1,643	23	9,263	12,043	241,252
Combustión comercial/institucional	58	58	N/S	618	1,061	52
Combustión habitacional	257	257	1	2,563	4,542	224
Operación de aeronaves	27	26	N/S	4,083	4,816	2,053
Locomotoras (foráneas/ patio)	36	36	12	194	1,529	63
Terminales de Autobuses de pasajeros	1	1	N/S	73	44	14
Recubrimiento de superficies industriales	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	24,994
Pintura automotriz	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	2,711
Recubrimiento de superficies arquitectónicas	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	23,403
Pintura tránsito	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	781
Limpieza de superficie industrial	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	21,346
Lavado en seco	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	7,614
Artes gráficas	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	7,905
Aplicación de asfalto	N/E	N/E	N/E	N/A	N/A	295
Distribución y almacenamiento de gasolina	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1,167
Carga de combustible en aeronaves	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	6
Distribución y almacenamiento de gas LP	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	4,637
Fugas en instalaciones de GLP	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	27,964
HCNQ en la combustión de gas LP	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	34,658
Panaderías	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	5,060
Esterilización en hospitales	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	22
Rellenos sanitarios	N/A	N/A	N/A	141	N/A	11,643
Tratamiento de aguas residuales	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	2,158
Incendios forestales	113	96	10	1,061	38	35
Incendio en estructuras	34	31	N/E	530	13	29
Caminos pavimentados	2,693	N/S	N/A	N/A	N/A	N/A
Caminos sin pavimentar	11,459	1,138	N/A	N/A	N/A	N/A
Uso comercial y doméstico de solventes	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	62,418
Fuentes móviles	3,902	2,849	3,306	1,552,204	154,919	185,384
Autos particulares	963	511	1,665	638,104	60,662	90,653
Taxis	183	96	322	190,259	20,995	14,362
Vagonetas y Combis	49	31	87	114,161	5,868	7,585
Microbuses	52	30	102	106,237	10,923	14,063
Pick up	68	41	118	106,005	4,930	9,526
Vehículos de carga de hasta 3 ton.	103	85	100	44,535	2,791	4,816
Tractocamiones	1,455	1,218	241	27,177	16,702	4,544
Autobuses	391	338	402	35,267	22,005	5,588
Vehículos de carga mayores a 3 ton.	541	443	178	134,444	8,194	7,985
Motocicletas	91	53	88	155,951	1,648	26,225
Metrobuses	6	3	3	64	201	37
Vegetación y suelos	730	148	N/A	N/A	1,031	35,585
Vegetación	N/A	N/A	N/A	N/A	1,031	35,585
Erosión eólica del suelo	730	148	N/A	N/A	N/A	N/A
Total	24,296	5,499	6,704	1,568,428	188,087	591,399

N/A: No Aplica, N/S: No Significativo, N/E: No Estimado, HCNQ: Hidrocarburos No Quemados, *Excluye los derivados del petróleo y del carbón, **Incluye instrumentos quirúrgicos y de precisión.

Tabla 3.3 Inventario de emisiones porcentual, ZMVM, 2008

Sector	Emisiones [%]					
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO _x	COV
Fuentes puntuales	20.5	15.6	50.3	0.4	10.7	21.8
Productos alimenticios, bebidas y tabaco	3.58	1.31	2.03	0.03	0.75	1.26
Textiles, prendas de vestir e industria del cuero	1.92	0.58	2.16	0.01	0.19	2.00
Industria de la madera y productos de madera	0.46	0.16	2.21	0.00	0.02	0.30
Papel y productos de papel, imprenta y editoriales	0.57	1.36	7.65	0.03	0.65	3.90
Sustancias químicas, productos derivados del petróleo y del carbón, de hule y de plástico	3.23	1.65	12.57	0.04	0.81	10.85
Productos minerales no metálicos	5.82	5.13	16.54	0.06	0.85	0.22
Industrias metálicas básicas	0.64	0.47	3.16	0.04	1.00	0.35
Productos metálicos, maquinaria y equipo	3.39	1.29	3.13	0.10	0.53	2.70
Otras industrias manufactureras	0.11	0.07	0.66	0.00	0.06	0.25
Generación de energía eléctrica	0.81	3.58	0.22	0.14	5.84	0.02
Fuentes de área	60.4	29.9	0.3	0.6	6.4	40.8
Combustión comercial/institucional	0.24	1.05	N/S	0.04	0.56	0.01
Combustión habitacional	1.06	4.67	0.01	0.16	2.41	0.04
Operación de aeronaves	0.11	0.47	N/S	0.26	2.56	0.35
Locomotoras (foráneas/ patio)	0.15	0.65	0.18	0.01	0.81	0.01
Terminales de Autobuses de pasajeros	N/S	0.02	N/S	0.00	0.02	0.00
Recubrimiento de superficies industriales	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	4.23
Pintura automotriz	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.46
Recubrimiento de superficies arquitectónicas	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	3.96
Pintura tránsito	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.13
Limpieza de superficie industrial	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	3.61
Lavado en seco	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.29
Artes gráficas	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.34
Aplicación de asfalto	N/E	N/E	N/E	N/A	N/A	0.05
Distribución y almacenamiento de gasolina	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.20
Carga de combustible en aeronaves	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.00
Distribución y almacenamiento de gas LP	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.78
Fugas en instalaciones de GLP	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	4.73
HCNQ en la combustión de gas LP	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	5.86
Panaderías	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.86
Esterilización en hospitales	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.00
Rellenos sanitarios	N/A	N/A	N/A	0.01	N/A	1.97
Tratamiento de aguas residuales	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.36
Incendios forestales	0.47	1.75	0.15	0.07	0.02	0.01
Incendio en estructuras	0.14	0.56	N/E	0.03	0.01	0.00
Caminos pavimentados	11.08	N/S	N/A	N/A	N/A	N/A
Caminos sin pavimentar	47.16	20.69	N/A	N/A	N/A	N/A
Uso comercial y doméstico de solventes	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	10.55
Fuentes móviles	16.1	51.8	49.3	99.0	82.4	31.3
Autos particulares	3.96	9.29	24.84	40.68	32.25	15.33
Taxis	0.75	1.75	4.80	12.13	11.16	2.43
Vagonetas y Combis	0.20	0.56	1.30	7.28	3.12	1.28
Microbuses	0.21	0.55	1.52	6.77	5.81	2.38
Pick up	0.28	0.75	1.76	6.76	2.62	1.61
Vehículos de carga de hasta 3 ton.	0.42	1.55	1.49	2.84	1.48	0.81
Tractocamiones	5.99	22.15	3.59	1.73	8.88	0.77
Autobuses	1.61	6.15	6.00	2.25	11.70	0.94
Vehículos de carga mayores a 3 ton.	2.23	8.06	2.66	8.57	4.36	1.35
Motocicletas	0.37	0.96	1.31	9.94	0.88	4.43
Metrobuses	0.02	0.05	0.04	0.00	0.11	0.01
Vegetación y suelos	3.0	2.7	N/A	N/A	0.5	6.0
Vegetación	N/A	N/A	N/A	N/A	0.55	6.02
Erosión eólica del suelo	3.00	2.69	N/A	N/A	N/A	N/A
Total	100	100	100	100	100	100

N/A: No Aplica, N/S: No Significativo, N/E: No Estimado, HCNQ: Hidrocarburos No Quemados, *Excluye los derivados del petróleo y del carbón, **Incluye instrumentos quirúrgicos y de precisión.

3.1 Emisiones por entidad

Para instrumentar medidas que mejoren la calidad del aire, es importante conocer de dónde provienen las emisiones y diferenciar la entidad y/o la jurisdicción a la que pertenecen; consiguiendo así responsabilizar el control y la reducción a quien corresponde. A continuación se presentan las emisiones generadas en la ZMVM y su contribución porcentual por cada jurisdicción (Tabla 3.4).

Tabla 3.4 Contribución de emisiones por entidad, 2008

	Fuentes puntuales			Fuentes de área			Fuentes móviles			Fuentes naturales			Total		
	ZMVM	DF	EM	ZMVM	DF	EM	ZMVM	DF	EM	ZMVM	DF	EM	ZMVM	DF	EM
	ton/año	%		ton/año	%		ton/año	%		ton/año	%		ton/año	%	
PM₁₀	4,986	27	73	14,678	17	83	3,902	64	36	730	15	85	24,296	27	73
PM_{2.5}	859	17	83	1,643	21	79	2,849	65	35	148	15	85	5,499	43	57
SO₂	3,375	10	90	23	39	61	3,306	56	44	N/A	N/A	N/A	6,704	33	67
CO	6,961	15	85	9,263	69	31	1,552,204	46	54	N/A	N/A	N/A	1,568,428	46	54
NOx	20,094	13	87	12,043	62	38	154,919	56	44	1,031	16	84	188,087	52	48
COV	129,178	28	72	241,252	44	56	185,384	53	47	35,585	25	75	591,399	42	58

N/A: No Aplica

El Estado de México es la entidad que más contribuye en las emisiones de las fuentes puntuales, aunque dicha entidad concentra aproximadamente la mitad de la industria de la ZMVM. Asimismo, presenta altas emisiones de PM₁₀ debidas a las vialidades sin pavimentar.

La emisión de partículas del sector industrial es debido a que en el Estado de México se localizan las termoeléctricas, varias cementeras y además, ciertos sectores utilizan materias primas que liberan partículas, como son las arcillas, cementos y harinas. Otros contaminantes atribuidos a las termoeléctricas son el CO y los NOx. De manera general, las emisiones de SO₂, son debidas al uso de combustibles líquidos, los cuales contienen una mayor cantidad de azufre que los gaseosos.

En lo que se refiere a COT, las emisiones del Estado de México son elevadas debido a que en esta entidad se ubica el relleno sanitario Bordo Poniente, aún cuando aquí se depositan los residuos sólidos de ambas entidades.

Respecto a las PM2.5, las fuentes móviles del Distrito Federal son mayores, ya que a que aquí se registra una gran cantidad de flota vehicular a diesel, cabe mencionar que el registro de los vehículos, muchas veces se realiza independientemente del lugar de residencia de la unidad. En el caso de los NOx de las fuentes de área, éstos son elevados en el Distrito Federal, por causa de la operación de aeronaves (Figura 3.2).

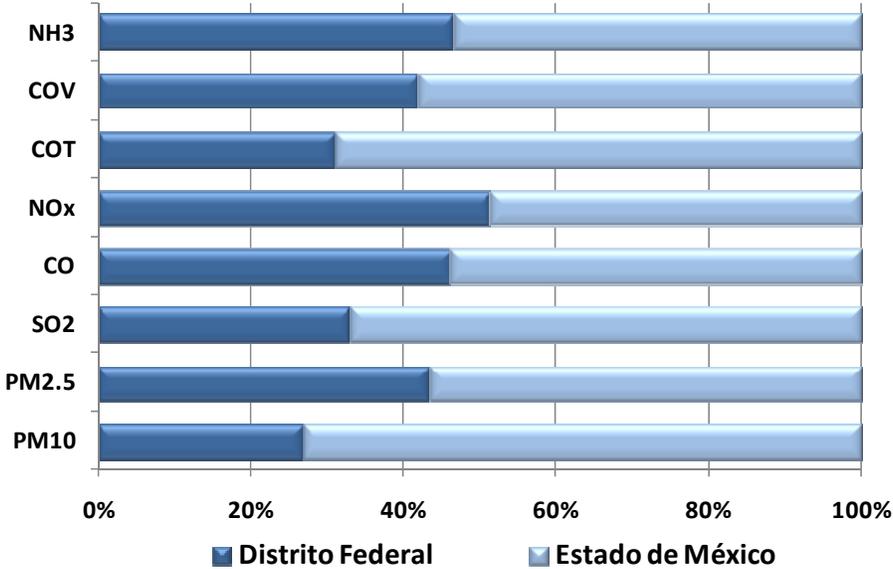


Figura 3.2 Emisiones de la ZMVM por entidad en el 2006

Capítulo 4 Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de la ZMVM

Las estimaciones publicadas por la autoridad ambiental federal, referente a las emisiones de GEI a nivel nacional y presentadas en la Cuarta Comunicación de México ante la UNFCCC, México generó 711.6 millones de toneladas de CO₂ equivalente al año 2006; teniendo así que nuestro país contribuye con el 1.5% a las emisiones mundiales generadas por el consumo de combustibles fósiles²¹ (SEMARNAT-INE, 2009).

Estudios realizados por Goldemberg y Krugman (en INE, 2006), mencionan que el consumo de energía guarda relación con el nivel de bienestar de la población de un país. Teniendo así, que a medida que la población puede satisfacer sus necesidades básicas (vivienda, alimentación, salud) y busca satisfacer necesidades secundarias, tiende a un mayor consumo de energía; lo cual se realiza, en su mayoría, a través del consumo de energéticos de origen fósil.

Según el Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2008-2012 y el Inventario Nacional 1990-2002, la ZMVM aportaba 58.9 millones de toneladas de CO₂ equivalente. Actualmente, con base en el Inventario de Emisiones de GEI del año 2008, se ha estimado que los gases de efecto invernadero ascienden a 51.5 millones de toneladas de CO₂ equivalente, lo que representa el 7.2% de las emisiones nacionales de GEI, reportadas por el gobierno federal en el año 2009, durante la Cuarta Comunicación de México ante la UNFCCC.

La Tabla 4.1 presenta los resultados del Inventario de Emisiones de GEI de la ZMVM 2008, por sector y contaminante (SMA-GDF, 2010b). Asimismo, en la Tabla 4.2 se muestran las emisiones de la ZMVM, en unidades de CO₂ equivalente.

²¹Emisiones reportadas con base en Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, 1990-2006.

Tabla 4.1 Emisiones de GEI por contaminante, ZMVM-2008

Sector	Emisiones de GEI [ton /año]		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Industrial	14,805,764	351	53
Comercial-servicios	1,096,550	24	2
Habitacional/Residencial	4,686,980	141	7
Transporte carretero	22,290,505	3,080	1,411
Otras fuentes*	889,249	287,501	27
Total	43,769,048	291,097	1,500

*Incluye operación de aeronaves, locomotoras, terminales de autobuses, distribución y almacenamiento de gas LP, fugas en instalaciones de GLP, hidrocarburos no quemados (HCNQ) en la combustión de gas LP, incendios forestales y rellenos sanitarios.

Tabla 4.2 Emisiones totales de GEI, ZMVM-2008

Sector	Toneladas anuales de CO ₂ equivalente
Industrial	14,830,333
Comercial-Servicios	1,097,754
Habitacional/Residencial	4,692,591
Transporte carretero	22,787,983
Otras fuentes*	8,084,808
Total	51,493,469

En total se generaron 51.5 millones de toneladas de CO₂ equivalente, de las cuales, el sector transporte genera el 44%, el segundo lugar en emisiones lo ocupa la industria con el 29% y finalmente, el sector residencial y comercial aportan en conjunto el 11% (Figura 4.1).

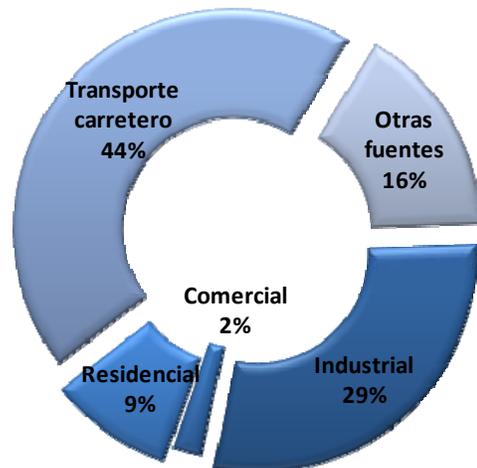


Figura 4.1 Contribución porcentual de GEI por tipo de fuente

A continuación se presentan las emisiones desagregadas en toneladas de CO₂ equivalente, así como su porcentaje de participación en las emisiones totales de GEI de la ZMVM (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 Emisiones de GEI desagregadas por categoría, ZMVM-2008

Sector	Emisiones equivalentes de CO ₂ [ton /año]	%
Industrial	14,830,333	29%
Productos alimenticios, bebidas y tabaco	1,223,861	2.4%
Textiles, prendas de vestir e industria del cuero	378,865	0.7%
Industria de la madera y productos de madera	28,613	0.1%
Papel y productos de papel, imprenta y editoriales	1,193,165	2.3%
Sustancias químicas, productos derivados del petróleo y del carbón, de hule y de plástico	1,751,559	3.4%
Productos minerales no metálicos. excluye los derivados del petróleo y del carbón	2,523,487	4.9%
Industrias metálicas básicas	352,023	0.7%
Productos metálicos, maquinaria y equipo. Incluye instrumentos quirúrgicos y de precisión	3,769,854	7.3%
Otras industrias manufactureras	51,829	0.1%
Generación de energía eléctrica	3,556,952	6.9%
Fugas en instalaciones a GLP	N/S	N/S
HCNQ en la combustión de GLP	125	N/S
Comercial-institucional	1,097,754	2%
Combustión comercial-institucional	1,097,571	2.1%
Fugas en instalaciones a GLP	8	N/S
HCNQ en la combustión de GLP	175	N/S
Residencial o habitacional	4,692,591	9%
Combustión habitacional	4,690,941	9.1%
Fugas en instalaciones a GLP	850	N/S
HCNQ en la combustión de GLP	800	N/S
Transporte carretero	22,787,983	44%
Autos particulares	11,871,316	23.1%
Taxis	2,254,964	4.4%
Combis	556,759	1.1%
Microbuses	1,640,510	3.2%
Pick up	791,669	1.5%
Vehículos de menos de 3 ton	571,887	1.1%
Tractocamiones	1,338,800	2.6%
Autobuses	2,264,735	4.4%
Vehículos de más de 3 ton	1,087,219	2.1%
Motocicletas	391,892	0.8%
Metrobuses	18,232	0.04%
Otras fuentes	8,084,808	16%
Operación de aeronaves	7,878	0.02%
Locomotoras (foráneas/ patio)	79,011	0.2%
Terminales de autobuses	3,332	0.01%
Distribución y almacenamiento de GLP	150	N/S
Incendios forestales	19,855	0.04%
Rellenos sanitarios	7,974,582	15.5%
Total	51,493,469	100%

N/S; No significativo

HCNQ: Hidrocarburos no quemados

4.1 Emisiones de GEI y consumo energético

Considerando que el consumo de energía está involucrado en la mayoría de las actividades cotidianas y que éste es el principal responsable de la generación de emisiones de gases de efecto invernadero, a continuación se presentan las emisiones por sector, así como su consumo energético (Tabla 4.4), en la sección de consumo energético se mostraron los combustibles utilizados en cada sector.

Tabla 4.4 Emisiones de CO₂ equivalente y consumo energético, ZMVM-2008

Sector	Consumo energético		Emisiones equivalentes de CO ₂	
	[PJ/año]	[%]	[ton /año]	[%]
Transporte	344.4	59.8	14,830,333	29
Industrial	137.6	23.9	1,097,754	2
Habitacional	76.5	13.3	4,692,591	9
Servicios	17.5	3	22,787,983	44
Otras Fuentes	N/S	N/S	8,084,808	16
Total	576	100	51,493,469	100

N/S; No significativo

Debido a que el sector de transporte carretero es el que consume más energía, también es el que genera la mayor cantidad de gases de efecto invernadero, teniendo así que para el año 2008, sus emisiones representaron el 44% de las emisiones de CO₂ equivalente. En este sector, cabe destacar que la demanda energética es cubierta básicamente por la combustión de gasolina.

De las emisiones generadas por el transporte carretero, los autos particulares junto con las motocicletas, que son unidades de uso particular, representan el 87% de la flota total y generan el 54% de los GEI. A pesar de los beneficios alcanzados en los últimos años sobre la eficiencia energética de los vehículos particulares, las preferencias por modelos más potentes, pesados y más grandes, han anulado gran parte de los beneficios conseguidos en la eficiencia, dando como resultado un cambio mínimo en la economía del combustible de la flota vehicular promedio (INE-SEMARNAT, 2004)

De las emisiones industriales, la elaboración de productos metálicos y el sector de generación de energía son los más contaminantes, generando el 25% y 24% respectivamente. Otro sector importante en emisiones es la elaboración de productos minerales no metálicos, que contribuye con el 17% de las emisiones industriales.

Una categoría importante de mencionar es el sector habitacional y de servicios, el cual genera emisiones por quema de Gas LP y por el consumo de energía eléctrica, además de las emisiones de metano que se generan en los rellenos sanitarios, las cuales son emitidas de manera indirecta.

A continuación, la Figura 4.2 presenta las categorías de mayor emisión de GEI en la Zona Metropolitana del Valle de México, expresadas como porcentaje de las emisiones de CO₂ equivalente.

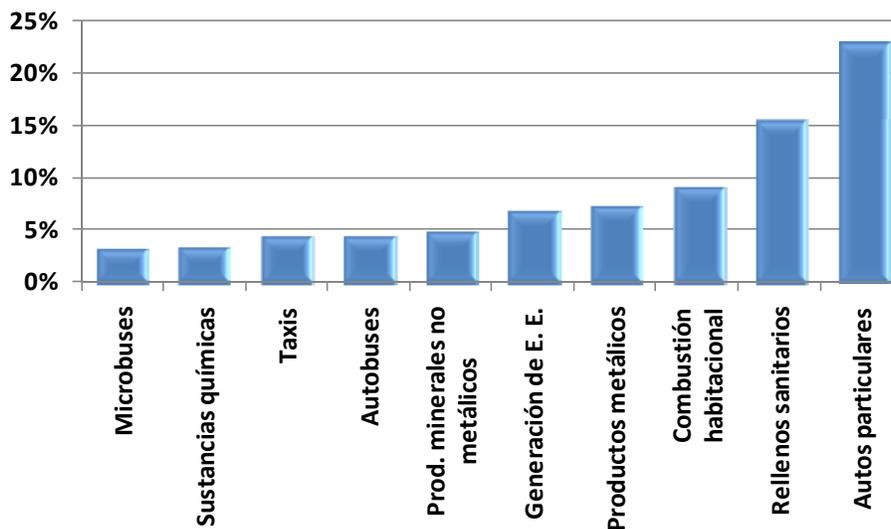


Figura 4.2 Principales categorías de emisión de GEI en la ZMVM, 2008 [% CO₂ eq.]

Capítulo 5 Construcción de vialidades en la ZMVM

La acelerada urbanización de los países ha generado la creación de grandes ciudades y zonas metropolitanas, las cuales exigen infraestructura y sistemas de transporte con la capacidad de movilizar masivamente a la población de forma segura, rápida y eficiente (SCT, 2008).

La movilidad urbana dentro del contexto del desarrollo sustentable en varias zonas de la Ciudad, necesita urgentemente una reestructuración de su infraestructura y servicios. Puesto que una población creciente como la nuestra, con empleos, viviendas y accesos a educación, cultura y comercio, cada vez mas distanciados entre sí, genera un incremento en la demanda de viajes.

Debido a lo anterior, se requiere de un transporte ágil de alta capacidad, capaz de traer consigo una nueva alternativa para beneficio de la movilidad urbana logrando así, una disminución del tráfico vehicular, de los tiempos de traslado y por consiguiente, una reducción de emisiones contaminantes.

Para satisfacer la demanda de movilidad y dentro del marco del Plan Nacional de Desarrollo y el Programa Nacional de Infraestructura 2007-2012, se cuenta con el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010 y el Programa Integral de Transporte y Vialidad del Distrito Federal 2001-2006 (PITV), los cuales han establecido medidas que pretenden garantizar la movilidad de las personas y los bienes, mediante el ordenamiento de la circulación de los vehículos privados y públicos.

Entre las principales medidas, se contempla la construcción de corredores de transporte, la renovación del transporte de pasajeros y el desarrollo de vialidades que permitan aumentar las velocidades crucero; mismas que también están orientadas a disminuir la contaminación generadas del sector transporte.

Con la finalidad de otorgar una mejor infraestructura vial en la ZMVM y aumentar el nivel de servicio de la misma, en el transcurso de esta administración pública se han realizado algunas mejoras importantes como son: el segundo piso de Periférico, los distribuidores viales Heberto Castillo, San Antonio y Zaragoza y los puentes de Tarango, solo por mencionar algunas.

Además de las anteriores, la siguiente sección se presenta las vialidades en construcción del Distrito Federal, Estado de México y ZMVM, las cuales se tienen planeadas o en construcción para el periodo del 2007-2009, se toma como base este tiempo, con la finalidad de acotar el alcance de la presente tesis y debido a que los inventarios de emisiones se realizan de manera bianual.

5.1 Distrito Federal

En este contexto de movilidad sustentable, el Gobierno del Distrito Federal ha contemplado proveer de conectividad a diversas zonas de la Ciudad, por lo que tiene en desarrollo algunas obras viales, así como la planeación de otras tantas, a continuación se muestra una breve reseña de las principales construcciones viales en la Ciudad.

Sistema de Red de Metrobús de la Ciudad de México

Como parte de las obras de corredores de transporte, se presenta una lista en la Tabla 5.1, las cuales forman parte de las proyecciones de la red de Metrobús, con una total de aproximadamente 250 km de longitud.

En particular, el nuevo tramo de la Línea 1 del Metrobús que va de Indios Verdes a Dr. Gálvez y de éste al Monumento El Caminero, consta de 19.7 + 8.5 kilómetros destinados a un carril confinado (SO-GDF, 2009). Para lo anterior se desarrollo la siguiente infraestructura:

- 10 estaciones
- 5 puentes peatonales
- Gaza de Viaducto Tlalpan que tiene una ampliación y una bahía de descarga.
- Carril Confinado pavimentado con concreto hidráulico
- El puente vehicular El Caminero, está integrado por dos cuerpos. El primero, es el retorno de Av. Insurgentes con una longitud de 498 metros y un ancho de 7.5 metros; el segundo cuenta con una amplitud de 162 metros y un ancho de 7.5 m.
- La construcción inició el 7 de noviembre 2007 y terminó el 7 marzo 2008.

Tabla 5.1 Sistema de Red de Metrobús de la Ciudad de México

Ruta	Corredor	Servicios
A	Avenida de los Insurgentes	A1: Indios Verdes – Colonia del Valle A2: Indios Verdes – Insurgentes A3: Buenavista - El caminero
B	Eje 4 Sur	B1: Tacubaya - Tepalcates
C	Eje 3 Oriente	C1: Río de los Remedios - San Lázaro C2: San Lázaro - Campesinos C3: Campesinos - Glorieta de vaqueritos
D	Periférico Oriente	D1: Alameda Oriente - Constitución de 1917 D2: Constitución de 1917 - Glorieta de vaqueritos
E	Eje 1 Poniente	E1: Etiopía - Tenayuca
F	Avenida Constituyentes	F1: Tacubaya - Santa Fe
G	Eje 6 Sur	G1: San Antonio - Santa Marta
H	Eje 8 Sur	H1: Constitución de 1917 - Santa Marta
I	Eje 10 Sur	I1: Tláhuac - Tulyehualco

Además de la Línea 1, se tiene El corredor Eje 4 Sur para Metrobús (Tacubaya-Tepalcates), con una longitud de 18.9 kilómetros, un estimado de 34 estaciones, con una demanda aproximada de 143 mil pasajeros y con conexión a 8 líneas del metro (Metrobús 2009 y SETRAVI, 2008). Actualmente (marzo 2010), se han comenzado las obras para la construcción de la Línea 3 Eje 1 Poniente que va de Etiopía a Tenayuca (Metrobús, 2010).

Reapertura de la Calle 5 de Febrero y Programa de Rehabilitación de las calles del Centro Histórico

Este programa se tiene una superficie rehabilitada de más de 42 mil m², en la zona Oriente del perímetro A y 15 calles más, la superficie aproximada total es de 152 mil m².

Corredor Constituyentes

En la zona poniente se trabaja en el corredor Constituyentes, una solución integral del acceso de Toluca hacia el Distrito Federal, el cual se convertirá en una vialidad continua a lo largo de 16 kilómetros, hasta su enlace con el Circuito Interior; comprende la construcción de pasos vehiculares, el reencarpetado sobre la avenida Constituyentes y la Carretera Federal México Toluca.

Se llevará a cabo la ampliación de la prolongación de la avenida Centenario, el deprimido de Paseo de la Reforma-Palmas, 3 pasos vehiculares inferiores en el Eje 5 Poniente, además de numerosas adecuaciones geométricas en toda la zona.

Anillo Periférico-Centenario

En la zona norte se construye el distribuidor del Anillo Periférico-Centenario, con la incorporación de Avenida Gran Canal al Periférico, que se complementará con 4 kilómetros de nueva vialidad en esta avenida, desde el Eje 3 Norte hasta Eduardo Molina.

Circuito Interior

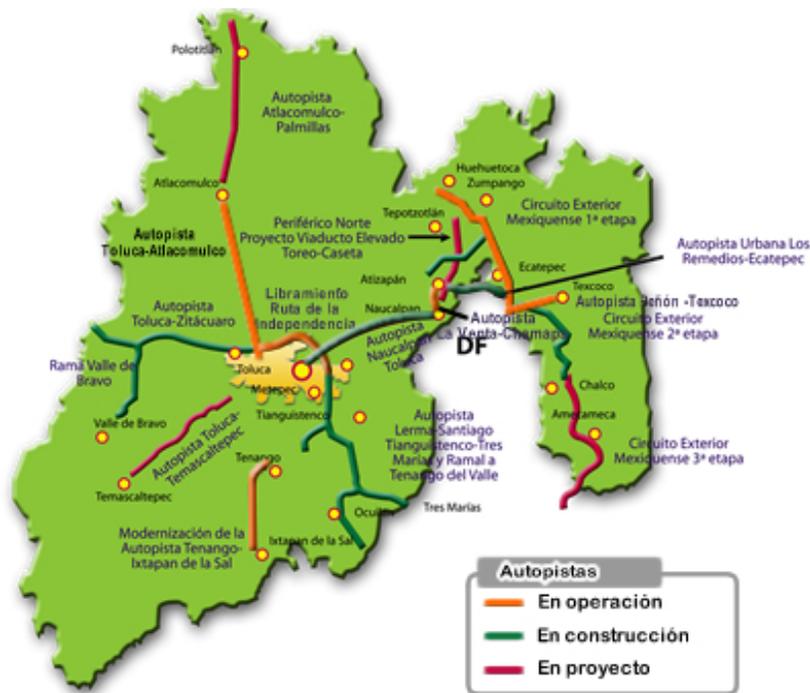
En cuanto al Circuito Interior, se llevan a cabo trabajos que comprende la construcción de 15 puentes vehiculares para convertirlo en una vialidad de acceso controlado a lo largo de aproximadamente 43 kilómetros de longitud (SO-GDF, 2009). Incluye la reposición de la carpeta asfáltica por concreto hidráulico en carriles centrales y laterales, paletas divisorias, alumbrado; construcción de guarniciones y banquetas; rehabilitación de 63 puentes peatonales, y la reposición de las áreas verdes en sus inmediaciones.

Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo Metro

Construcción de la Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo Metro, que cruzará de Mixcoac a Tláhuac en una longitud de 25 kilómetros, y contará con 21 estaciones y 2 terminales.

5.2 Estado de México

El Gobierno del Estado de México continúa promoviendo las actividades económicas y el asentamiento de nuevas industrias que generen empleos productivos, para lo cual es imperante contar con un Sistema Maestro de Autopistas acorde a las demandas del desarrollo Estatal y del País. En este sentido, se han concesionado a inversionistas privados mediante el esquema de licitación pública, los siguientes proyectos carreteros (Figura 5.1 y Tabla 5.2):



Fuente: <http://web.edomexico.gob.mx/portal/page/portal/secom/autopistas/> (marzo, 2009)

Figura 5.1 Red vial en construcción en el Estado de México

Tabla 5.2 Autopistas en construcción por parte del Gobierno del Estado de México

Autopista	Longitud (km)
1. Circuito Exterior Mexiquense	152.7
2. Toluca - Zitácuaro y Ramal a Valle de Bravo	84.0
3. Lerma - Santiago Tianguistenco - Ocuilan y ramal a Tenango del Valle	89.0
4. Naucalpan-Toluca	38.0
5. Los Remedios - Ecatepec	24.5
Total	388.2

Circuito Exterior Mexiquense

El Circuito Exterior Mexiquense permitirá comunicar las autopistas de: México - Querétaro, México – Pachuca y México - Puebla hasta los límites del estado de Morelos.

Actualmente se tienen poco más de 52 km en operación y se encuentra en construcción la Segunda Etapa en su tramo de 6.6 km, tramo Peñón Texcoco-Bordo de Xochiaca. Esta obra permitirá alcanzar conexión con la calzada Ignacio Zaragoza mediante las vialidades Carmelo Pérez y López Mateos; sus principales características se listan en la Tabla 5.3 .

Tabla 5.3 Circuito Exterior Mexiquense (Segunda etapa, tramo 1° y 2°)

Características	<p>Tramo 1.. Construcción de dos puentes de 660 m de longitud con 17 claros con longitudes que varían de 20 a 50 m y 2 terraplenes de aproximadamente 100 m cada uno, para albergar 6 carriles, 3 por sentido de circulación (por puente); permitirá eliminar un punto conflictivo de la zona limítrofe del Estado de México con el Distrito Federal, agilizando el tránsito de las avenidas 7 y Bordo de Xochiaca.</p> <p>Tramo 2. Entronque Nabor Carrillo - Autopista México -Puebla. 31.3 km.</p>
Trabajos por ejecutar	<ul style="list-style-type: none"> • cimentación a base de pilotes y zapatas • Subestructura formada con pilas de sección circular • Superestructura integrada por trabes pretensadas tipo AASHTTO y losa de compresión • Carpeta asfáltica • Drenaje pluvial • Señalamiento horizontal y vertical, así como alumbrado público.

La tercera Etapa comprende el Tramo 1, Entronque Chamapa - Lechería a Entronque Vialidad Mexiquense (Tabla 5.4).

Tabla 5.4 Circuito Exterior Mexiquense (Tercera etapa)

Tramo 1:	Entronque Chamapa - Lechería a Entronque Vialidad Mexiquense.
Longitud:	10.0 Km.
Avances:	
	Liberación del Derecho de Vía: 90%
	Proyecto Ejecutivo: 72%
	Impacto Ambiental: 100%
	Avance de Construcción: 5%
Tramo 2:	Entronque Vialidad Mexiquense a Entronque Tultepec.
Longitud:	10.0 Km.
Avances:	Liberación de Derecho de Vía: 89.3%
	Proyecto Ejecutivo: 25%
	Impacto Ambiental: 100%
	Avance de Construcción: 0%

Los Remedios – Ecatepec

La obra de Los Remedios – Ecatepec proporcionará una vía de altas especificaciones en el norte del Valle de México, permitirá unir las zonas este y oeste, desde el Ex Lago de Texcoco, hasta Puente de Vigas en Tlalnepantla (Figura 5.2). Se inició la construcción de la 1a etapa de 6 km, tramo Puente de Vigas - Calzada Vallejo en febrero de 2008, mismo que se tiene contemplado iniciar operación en 2009 (Tabla 5.5).

Tabla 5.5 Los Remedios-Ecatepec

Longitud total	30.0 km
Primera Etapa	Puente de Vigas- Autopista Peñón Texcoco 21 km
Segunda Etapa	Tramo Puente de Vigas - Circuito Exterior Mexiquense 9.0 km
Tránsito	13,000 veh./día
Carriles	Seis; tres por sentido
Tiempo de recorrido	15 minutos



Fuente: <http://edomex.gob.mx/portal/page/portal/secom/autopistas/losremedios> (marzo, 2009)

Figura 5.2 Trazo de la vialidad Los Remedios-Ecatepec

Viaducto Elevado Bicentenario (Periférico Norte-Toreo-Caseta Tepetzotlán)

Para el caso de Periférico Norte, Viaducto elevado Toreo - Caseta Tepetzotlán, se mencionan los siguientes datos de construcción (Tabla 5.6):

Tabla 5.6 Periférico Norte

Primera etapa, Toreo-Tepalcapa	Un cuerpo de tres carriles de circulación (sentido sur-norte)
Longitud:	22 km.
Emisión de fallo:	21 de mayo de 2008.
Inicio de construcción:	1 de septiembre de 2008
Inicio de operación:	julio 2009, tramo 1 Toreo - Lomas Verdes
Segunda etapa: Tepalcapa-Toreo	Un cuerpo de tres carriles de circulación (sentido norte-sur)
Longitud:	22 km.
Tercera etapa: Tepalcapa-Tepetzotlán	Dos cuerpos de tres carriles de circulación (ambos sentidos)
Longitud:	10 Km.
Ancho de calzada:	12.60 m.
Tránsito:	30,300 veh/día
Distribuidores viales:	13

Sistema TransMexiquense Bicentenario Línea METROMEX Ciudad Azteca – Tecámac

Este sistema tendrá una longitud de 16 kilómetros con las siguientes características (Tabla 5.7):

Tabla 5.7 Sistema TransMexiquense Bicentenario

Longitud	16.0 km.
Estaciones de paso	24
Estaciones de transferencia modal	3
Demanda Total	130,000 por/día
Población beneficiada	1'100,000 habitantes
Municipios atendidos	Ecatepec, Tecámac
Situación actual	1. Carriles de circulación en construcción. 2. Terminales y estaciones en proceso de construcción.

Fuente: <http://edomex.gob.mx/portal/page/portal/secom/transporte/tarticcdazt> (marzo, 2009)

Ampliación a 4 carriles de la carretera Chalco-Tláhuac y Chalco-Huitzilzingo

En respuesta a una demanda reiterada de la población de la localidad y de los usuarios que transitan por estas vialidades, se ampliaron a cuatro carriles las carreteras que conectan el D.F., hacia Chalco y a Huitzilzingo; sumando un aproximado de 14 kilómetros de obra en 2007 (GEM, 2009).

Se realizaron ampliaciones en los tramos Chalco-Tláhuac y Chalco-Huitzilzingo, implicando la reubicación de postes de suministro eléctrico, líneas telefónicas y alumbrado público, así como señalamiento vertical y horizontal.

Ampliación de la carretera Tecámac-Zumpango

A fin de proporcionar mejores condiciones de seguridad a los habitantes y un servicio de calidad vial a los usuarios, se amplió a dos carriles de circulación la carretera Tecámac-Zumpango en un tramo de 1.2 km y se reforzó la señalización vertical y horizontal.

Entre las obras viales que se encuentran pendientes y o en proceso en el Estado de México, están las siguientes:

- Proyecto del Tren Suburbano La Paz-Texcoco y La Paz-Chalco.
- Pavimentación y rehabilitación de 40 km. de vialidades primarias en el Municipio de Valle de Chalco Solidaridad.
- Ampliación a 4 carriles de la carretera Chalco-Nepantla.
- Construcción del libramiento vial en la Cabecera Municipal con dirección a Nicolás Romero.
- Programa de rehabilitación y mejoramiento de vialidades intermunicipales y construcción de puentes peatonales (50 km).
- Proyecto del tren suburbano del oriente La Paz-Ixtapaluca.
- Construcción del entronque Río de los Remedios con la autopista México-Pachuca.
- Ampliación del puente de la vialidad López Mateos a tres carriles (Puente de Vigas).
- Conclusión del Libramiento Sur de Tepetzotlán.
- Construcción de vialidad para interconectar a Tonanitla con el Circuito Exterior Mexiquense.

5.3 Zona Metropolitana del Valle de México

Eje Troncal Metropolitano

Eje Troncal Metropolitano Ciudad Azteca a Xochimilco de 35 km de longitud en cuatro tramos, comprende cuatro distribuidores con 5 km de longitud: Av. del Taller – Eje 3 Oriente, Distribuidor Vial Periferico- Muyuguarda, Distribuidor Vial Calzada de la Virgen y Puente Av. Santa Ana.

Tren Suburbano

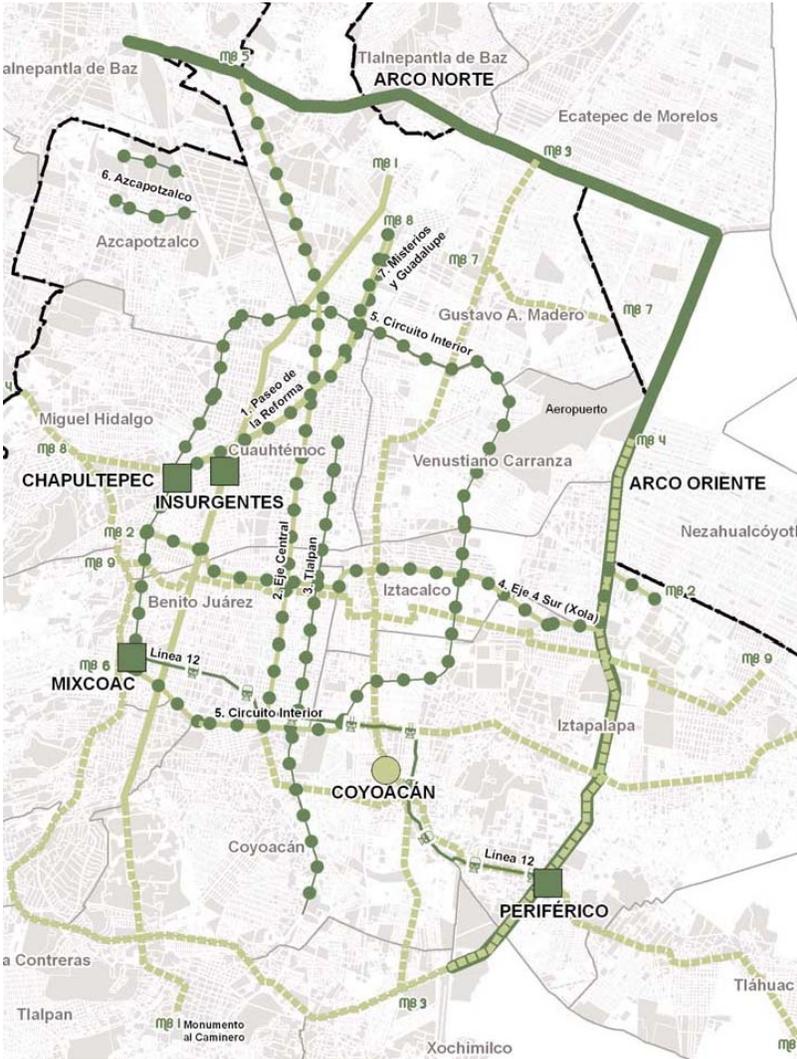
La configuración del Tren Suburbano representa en su conjunto, un total de 246 km de vía férrea distribuidos en tres Sistemas integrales.

- **Sistema 1:** actualmente en operación en 5 de las 7 estaciones, se constituye de 27 km en la ruta Buenavista-Cuautitlán.
- **Ampliación del Sistema 1:** consiste en la construcción de 20.2 km de Cuautitlán a Huehuetoca. Además existen dos líneas secundarias extras que van de San Rafael a Tacuba (10 km) y de Lechería a Jaltocan (21 km).
- **Sistema 2** (en licitación): representa 21 km en la ruta Martín Carrera-Ecatepec. Las líneas secundarias que se tienen previstas para su construcción en un futuro tienen una longitud aproximada de 68 km.
- **Sistema 3** (en licitación): se constituye de 6 estaciones a lo largo de 13 km en la ruta Chalco-La Paz. Incluye en total 11 estaciones para las dos etapas (Chalco-La Paz y La Paz-Línea B Metro).

Anillo Periférico Arco Oriente

Se complementará el Anillo Periférico en el arco oriente y se plantea la construcción de 3 puentes vehiculares que se ubicarán en las Avenidas Tláhuac y Bilbao, así como en el Eje 5 Sur y 4 km de vialidad en el tramo de Cuemanco a Avenida Tláhuac. Arco Oriente: desde el Canal de Cuemanco hasta Río de los Remedios; Arco Norte: desde el Municipio de Nezahualcóyotl en el Estado de México, hasta la Calzada Vallejo.

Su finalidad es completar el circuito y rodear totalmente a la región conurbada de la Ciudad de México; incluye: construcción de vialidad a nivel (40.80 km); 22 puentes vehiculares; mejoramiento urbano y reforestación (Figura 5.3). Debido a que esta avenida conecta al Distrito Federal con el Estado de México, el proyecto tiene un alcance regional y mejorará la movilidad y desplazamientos enlazando el entorno de la metrópoli (Metropoli, 2007).



Fuente: Metropoli, 2007
Figura 5.3 Anillo periférico

A continuación se presenta una tabla resumen (Tabla 5.8), la cual contiene la longitud total a construir y la longitud construida durante el periodo 2007 a 2009. La información dicha tabla es la base de cálculo para la estimación de emisiones de la construcción de vialidades del presente documento.

Tabla 5.8 Tramos viales construidos y/o en construcción, ZMVM

Vialidad	Longitud Total (km)	Longitud** construida (km)
Metrobus Insurgentes	9.2	9.2
B1: Tacubaya - Tepalcates	21	21.0
Calles Centro histórico	218.9	218.9
Corredor Constituyentes	2.1	2.1
Anillo Periférico-Centenario	2.1	1.2
Circuito Interior	41.6	41.6
Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo Metro	25.1	3.5
Eje Troncal Metropolitano (Ciudad Azteca a Xochimilco)	35.0	5.0
Circuito Exterior Mexiquense	152.7	7.0
Viaducto elevado Bicentenario	32.0	11.6
Sistema TransMexiquense Bicentenario Línea METROMEX Ciudad Azteca – Tecámac	16.0	3.0
Ampliación de la carretera Chalco-Tláhuac y Chalco-Huitzilzingo	14.5	14.5
Ampliación de la carretera Tecámac-Zumpango	1.2	1.2
Proyecto del Tren Suburbano Buenavista-Cuautitlán-Huehuetoca	47.0	27.0
Anillo Periférico en el arco oriente	2.7	1.1
Los Remedios - Ecatepec	24.2	6.0
Total	645.3	373.9

** La longitud construida en algunas obras no finalizadas durante 2007-2009, se estimó con base en el porcentaje de avance al año 2009.

Para el cálculo de emisiones se estableció el periodo de 2007 a 2009, con la finalidad de utilizar, en la medida de lo posible, obras completas o que al menos hayan realizado diferentes fases de construcción (limpieza, excavación, nivelación, construcción, entre otras) en alguno de sus tramos.

En total, en la ZMVM, se tiene calculada la construcción de 645 km de obras viales para el periodo aproximado de 2007 a 2012, el estimado para 2007-2009 es de 374 km, con una superficie de 3.2 millones de m².

Capítulo 6 Emisiones contaminantes en la actividad de la construcción y metodologías para su estimación

De las actividades industriales, la actividad de la construcción es la mayor consumidora de recursos naturales. De ellos podemos mencionar, la madera, minerales, agua y grandes cantidades de energía. La construcción puede consumir entre el 20 y el 50% de los recursos físicos según su entorno, teniendo especial responsabilidad en el deterioro del ambiente, pues hay que considerar los costos ambientales que suponen tanto la extracción de los recursos minerales, como la deposición de los residuos originados (Alavedra *et al.*, 1998).

En la industria de la construcción, la principal causa de impactos que afecta al ambiente es la generación de residuos, provenientes de la demolición y las tierras excedentes de excavación. Mientras que los primeros se generan principalmente en las obras de edificación, las tierras excedentes de excavación se presentan en mayores volúmenes en las obras civiles, principalmente en obras de infraestructura vial, como las autopistas.

Otro impacto significativo son las emisiones a la atmósfera, en específico las emisiones de partículas, como consecuencia de la demolición, movimientos de tierras y circulación de maquinaria, entre las principales. Los tubos de escape de la maquinaria también generan emisiones de gases contaminantes, como el CO, CO₂, NO_x, SO₂ y partículas, en especial las unidades a diesel son grandes generadoras de partículas finas. Además, durante la construcción también existe la contaminación por ruido.

De manera general, se pueden identificar tres fuentes principales de emisiones:

- **Tránsito de vehículos desde y hacia la obra:** Involucra dos tipos principales de emisiones al aire. La primera se refiere a la emisión de contaminantes por efecto de la combustión en el motor y la segunda al polvo que se levanta cuando los vehículos circulan de un lado a otro.
- **La construcción:** Involucra todas aquellas acciones que se realizan en forma individual y manual, como el movimiento de carretillas, obras de concreto, asfaltado de caminos, entre las principales.
- **Movimientos de tierras:** Se refiere a las faenas que utilizan exclusivamente maquinaria pesada, como acciones de emparejamiento de terreno, excavación de cimientos y zanjas para ductos de servicios básicos, entre las principales.

Es importante mencionar que aún cuando las emisiones atmosféricas de la construcción son de carácter temporal, no peligrosas y de impacto local limitado, pueden llegar a ser una fuente importante de contaminación por partículas, debido precisamente a ese carácter local, dichas emisiones pueden ocasionar efectos agudos.

Con base en lo anterior, el presente capítulo muestra una descripción de las emisiones de contaminantes criterio y de gases de efecto invernadero, generadas durante la construcción de vialidades, así como su método de cálculo, por etapa o actividad.

6.1 Métodos de estimación de emisiones

En esta sección se realiza una descripción de las emisiones generadas durante la actividad de la construcción, así como su forma de estimación; de la misma forma, se describirá de manera particular, las emisiones generadas por la construcción de vialidades y una metodología de cálculo.

De manera general se puede decir que las emisiones contaminantes de una actividad se calculan con un factor de emisión y un nivel de actividad.

Un **factor de emisión** es un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de contaminante liberado, con una **actividad** asociada (US-EPA, 2009)²². Usualmente se expresan como peso de contaminante emitido, por unidad de volumen, distancia o duración de actividad, entre otras.

La ecuación general de estimación en los inventarios de emisiones es:

$$E = A \times EF$$

Donde:

E = emisión

A = nivel de actividad

EF = factor de emisión

Uno de los principales contaminantes en la construcción son las partículas de polvo. El polvo fugitivo presente en la atmósfera surge de perturbaciones mecánicas de material granulado expuesto al aire. Cuando es generado por fuentes abiertas se denomina «fugitivo» debido a que no se descarga a la atmósfera en una corriente de flujo confinado. Las fuentes de polvos fugitivos más comunes incluyen caminos pavimentados y no pavimentados, operaciones agrícolas, depósitos de materiales de agregados y operaciones de construcción (US-EPA, 2009)²³.

²² AP-42. Compilación de factores de emisión de contaminantes del aire, generados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA por sus siglas en inglés).

²³ AP-42 Miscellaneous Sources. 13.2.2 Unpaved Roads.

La actividad de la construcción es una fuente de emisión de polvo que puede tener un impacto en la calidad del aire local. Según datos de la US-EPA²⁴, la edificación y construcción de caminos se consideran dos de las actividades de mayor potencial de emisiones. Las emisiones están asociadas a las actividades de limpieza del terreno, perforado y explosión, excavación de la tierra, corte y relleno, así como la construcción de accesos.

La construcción consiste en una serie de diferentes operaciones, cada una de las cuales tiene su propia duración y potencial de generación de polvo. Sin embargo, de manera general, la emisiones son proporcionales al área de suelo que será trabajada, por lo que puede relacionarse directamente con el contenido de sedimento del suelo (básicamente de las partículas menores a 75µm de diámetro), así como de la velocidad y el peso de los vehículos; también. Además, las emisiones son inversamente proporcionales al contenido de humedad del suelo.

De manera normal, las emisiones varían con el nivel de actividad y las condiciones meteorológicas que predominen durante el desarrollo y además, parte de las emisiones son resultado del tráfico de la maquinaria y vehículos sobre los caminos del sitio. Adicional a éstas, el material depositado en calles adyacentes también genera emisiones de resuspensión en los caminos pavimentados.

Según estudios de la US-EPA, las partículas suspendidas totales alrededor de los proyectos de construcción, es de 2.69 ton/ha/mes (US-EPA, 2009), el cual es aplicable a construcciones medianas y carga de sedimento moderado. Con mediciones de campo del *Midwest Research Institute* (MRI-Kansas City, Missouri), en la construcción de vialidades la emisión es de 1.04 ton/ha/mes (MRI, 1996).

Para el caso de México, las autoridades federales en materia ambiental y como parte del Programa de Inventario de Emisiones de México, recomiendan utilizar el factor de 0.25–0.27 ton/ha/mes, para emisiones de PM₁₀ sin control (Radial, International, 1997). Cuando se conoce el tipo de construcción se puede utilizar un factor de emisión más específico, como lo muestra la Tabla 6.1:

²⁴ AP-42 Miscellaneous Sources.13.2.3 Heavy Construction Operations.

Tabla 6.1 Factor de emisión de PM₁₀ por sitio de construcción

Sitio	Factor de emisión PM ₁₀ sin Control (ton/ha/mes)	Tipo de Construcción y Nivel de Actividad
A	0.072	Industrial – Actividad Moderada (atrincherado, prepavimentación, movimiento de tierra a pequeña escala)
B	0.72	Residencial – Actividad Moderada a Pesada (atrincherado, movimiento de tierra, barrenado y dinamitado, compactación)
C	0.18	Residencial – Actividad Moderada a Pesada (atrincherado, prepavimentación, acarreo del material de base para caminos)
D	0.0087	Residencial – Actividad Baja a Moderada (planeación y modificación del terreno)
E	0.90	Residencial – Actividad Pesada (movimiento de tierra, arrastre, apilado)
F	0.96	Residencial – Actividad Pesada (movimiento de tierra)
G	0.76	Comercial – Actividad Moderada a Pesada (atrincherado, acarreo de material de relleno)
Promedio recomendado	0.25	
	1.04* con control	Construcción de nuevo camino, sitios de gran actividad y movimiento de tierra
	0.27* con control	Sitios de construcción con actividad moderada, sin actividades de corte y relleno
	0.47* con control	Actividades de construcción no residenciales

Fuentes: Elaboración propia con información de Radian International, 1997. Vol. V Fuentes de área y *MRI, 1996.

De la revisión de información de emisiones de la construcción y, en particular de construcción de vialidades, se realizó la Tabla 6.2, en la cual se separan las emisiones por etapa o actividad de construcción y se relacionan con una metodología de cálculo. Pues cabe aclarar que los factores de emisión antes mostrados, son una manera muy general de estimación de las emisiones de la construcción.

Tabla 6.2 Actividades generadoras de emisiones y métodos de estimación

Fase de construcción	Actividad generadora de polvo/metodología de estimación
Demolición y remoción de escombros	Demolición de obstáculos
	1. Mecánica
	2. Explosión y taladreo
	Limpieza (uso de maquinaria)
	Carga de escombros en camiones
	Transporte de escombros
	Descarga de material (puede ser fuera del sitio)
Preparación del sitio	1. Uso de maquinaria pesada
	2. Carga de material removido en camiones
	3. Compactación (uso de maquinaria-dozer)
	4. Descarga de material (puede ser fuera del sitio)
Construcción	1. Tráfico vehicular en caminos (pavimentados y sin pavimentar)
	2. Almacenamiento de escombros
	3. Detonación (no se utiliza)
	4. Aplicación de asfalto
	5. Aplicación de pintura y soldadura
Terminado	1. Aplicación de pintura
Todas las fases	1. Erosión por viento
	2. Almacenamiento de escombros
	3. Tráfico vehicular en caminos (pavimentados y sin pavimentar)

Fuente: Elaboración propia con base en metodologías de la US-EPA.

A continuación se describe la metodología de cálculo en cada una de las etapas y/o actividades anteriores, considerando que se tienen los datos respectivos para cada una de ellas y que es una manera más detallada de la estimación.

6.1.1 Carga y descarga de material (pilas de material)

Las emisiones en las pilas de almacenamiento (montones de escombros), dependen del volumen de material que pasa a través de las diferentes etapas de la construcción y, en particular, las condiciones de la pila de almacenamiento depende de tres parámetros: la edad, el contenido de humedad y la proporción de material fino.

Cuando el material agregado es reciente, el potencial de emisiones se encuentra al máximo, con el tiempo éste disminuye (US-EPA, 2006)²⁵. Las emisiones de polvo ocurren en varios puntos: la carga de material, disturbios por acción de los vientos y descarga de material. Teniendo así que la cantidad de partículas generadas por la manipulación de material, puede ser estimado por:

$$E = k(0.0016) \frac{(U/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}} \quad (\text{kg/tonelada})$$

Donde:

E = factor de emisión

K = multiplicador de la partícula (adimensional),

U = velocidad media del viento (m/s), (mph)

M = contenido de humedad del material (%)

El valor de k varía con el tamaño de partícula:

< 30 µm	< 15 µm	< 10 µm	< 5 µm	< 2.5 µm
0.74	0.48	0.35	0.20	0.053 ^a

La ecuación antes expuesta aplica para cargas de sedimento de 0.44-19 %, contenido de humedad de 0.25-0.48 % y velocidades de viento de 0.6-6.7 m/s.

El tránsito de los vehículos también es una fuente de emisión en ésta actividad, sin embargo, se explicará en su respectiva sección.

6.1.2 Emisiones fugitivas (erosión por viento)

Durante los periodos de vientos de alta velocidad, las partículas pequeñas de polvo pueden ser arrastradas por el viento y emitidas a la atmósfera como partículas. Por lo general, estas emisiones se asocian con suelos perturbados, como los campos agrícolas en cultivo o grandes sitios de construcción. La erosión por viento se genera en las pilas de almacenamiento de material, así como en las áreas libres y/o accesos a las construcciones.

²⁵ AP-42. Miscellaneous Sources. 13.2.4 Aggregate Handling And Storage Piles.

Estas fuentes de emisión se caracterizan porque sus superficies no son homogéneas y contienen partículas de más de 1 cm de diámetro, sin embargo, también presentan una cantidad de material fino erosionable.

En esta categoría de emisión son importantes ciertos parámetros, como lo es el viento, su velocidad de fricción, la rugosidad de la superficie, las perturbaciones en la superficie y la exposición de material fresco, entre las principales (US-EPA, 2009)²⁶. Además, las emisiones pueden originarse en terrenos baldíos, en cunetas que contienen tierra suelta y en caminos sin pavimentar. De manera gradual, las fuentes que no se perturban de manera periódica pierden su capacidad para emitir polvo movido por el viento.

El cálculo de las emisiones de PM₁₀ generadas por la erosión, se basan en la metodología del Programa de Inventario de Emisiones para México que contempla una versión modificada de la ecuación de erosionabilidad del suelo, desarrollada por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Radian International, 1997).

En lo que se refiere a las PM_{2.5}, se estiman con base en el perfil de especiación del material particulado, propuesto por el CEIDARS (por sus siglas en inglés)²⁷, donde se considera que las PM_{2.5} representan aproximadamente el 11% de las partículas totales.

Ecuación modificada de erosionabilidad del suelo: $E = FS \cdot I \cdot C \cdot K \cdot L' \cdot V'$

Donde:

- E = Factor de emisión de partículas suspendidas en [ton/acre/año]
- FS = Fracción de las pérdidas totales por erosión del viento medidas como partículas suspendidas, este dato es adimensional.
- I = Erosionabilidad del suelo [ton/acre/año]
- C = Factor climático, adimensional.
- K = Factor de rugosidad del suelo, adimensional.
- L' = Factor de amplitud del campo sin protección, adimensional
- V' = Factor de cobertura vegetal, adimensional

²⁶ AP-42. Miscellaneous Sources. 13.2.5 Industrial Wind Erosion.

²⁷ California Emission Inventory And Reporting System, 2002.

Para el factor FS , se utiliza el valor de 3.8%, que corresponde a caminos sin pavimentar y otras áreas; asimismo, de la cantidad de pérdida de suelo que se suspende, aproximadamente el 50% son PM_{10} . El factor climático es calculado como sigue:

Factor Climático - C

El factor climático C depende de la velocidad del viento y de la humedad de la superficie del suelo. La tasa de movimiento del suelo varía directamente con la velocidad del viento e inversamente con la humedad de la superficie y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$C = \frac{(0.345)V^3}{\left[115 \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{PM_i}{TM_i - 10} \right)^{10/9} \right]^2}$$

donde: V = Velocidad media anual del viento (mph), corregida a 30 pies;
 PM = Precipitación mensual en pulgadas y
 TM = Temperatura promedio mensual en grados Fahrenheit (considerada igual a 28.4° si es inferior a 28.4°).

El factor de rugosidad del suelo K , está dado por la reducción en la erosión eólica a causa de la presencia de cerros, lomas, canales y surcos, entre los principales. Cuando la presencia de estos factores es mínima, se estima un valor de rugosidad de 1.

El factor de amplitud de campo sin protección L' se fundamenta en el producto de los factores de erosionabilidad (I) y rugosidad (K), en la amplitud de campo (L) se toma un valor de 0.32 para áreas con uso diferente al agrícola (Radian International, 1997; Návar y Treviño 1997).

El factor V' es la fracción anual de pérdida de suelo debida a que el campo tiene una cubierta vegetal, en los cálculos se hacen dos suposiciones, considerando $V'=1$ cuando el suelo no tiene cobertura vegetal y $V'=0.5$ si existe cobertura vegetal.

6.1.3 Caminos sin pavimentar

La generación del polvo en los caminos sin pavimentar se debe a la pulverización y abrasión de los materiales de la superficie, al aplicar una fuerza mecánica y por el arrastre de partículas de polvo por la acción de corrientes turbulentas de aire (US-EPA, 2009)²⁸. La estimación de las emisiones generadas en los caminos sin pavimentar por kilómetro recorrido (KRV o VMT por sus siglas en inglés), se puede realizar por medio de la siguiente ecuación:

$$E = k (s/12)^a (W/3)^b$$

Donde:

E = factor de emisión con base en el tamaño de la partícula (lb/VMT)

s = carga de sedimento de la superficie (%)

= 0.56-23 (promedio 8.5) en caminos industriales/sitios de construcción

W = peso medio de los vehículos (ton)

1 lb/VMT = 281.9 g/VKT

K, a, b son constantes empíricas

	PM-2.5	PM-10
k (lb/VMT)	0.15	1.5
a	0.9	0.9
b	0.45	0.45

Las emisiones aquí generadas pueden corregirse por una mitigación natural, dada por los días de lluvia (días con más de 0.254 mm de precipitación).

$$E_{\text{ext}} = E [(365 - P)/365]$$

Donde:

E_{ext} = factor de emisión por tamaño de partícula con mitigación natural

E = factor de emisión de la primera ecuación

P = número días con más de 0.254 mm de precipitación

Una vez calculado el factor de emisión por el tamaño de partícula, se multiplica por los KRV, obteniéndose la emisión total por caminos no pavimentados.

6.1.4 Caminos pavimentados

La ecuación para los caminos pavimentados incluye sólo el material resuspendido en la superficie del camino, no se incluyen las emisiones generadas por el escape de los vehículos, frenado y llantas.

²⁸ AP-42. Miscellaneous Sources 13.2.2, Unpaved Roads.

En caso de requerir las emisiones del escape, llantas y frenos para vehículos carreteros, se puede consultar el manual del modelo MobileMéxico 6.2 de la US-EPA, o el OFFROAD y NONROAD para vehículos no carreteros; los cuales se estimarán en su respectiva sección y se describirán más adelante.

La cantidad de partículas en suspensión por la pérdida de material del camino, generadas por el paso de los vehículos en caminos pavimentados, se puede estimar utilizando la siguiente expresión (US-EPA, 2009)²⁹:

$$E = k (sL/2)^{0.65} * (W/3)^{1.5} - C$$

Donde:

E = factor de emisión con base en el tamaño de la partícula (lb/VMT)

k = multiplicador de la partícula con base en el tamaño (ver más abajo)

sL = carga de sedimento de la superficie del camino (g/m²)

W = peso promedio de los vehículos (ton) (peso ponderado o promedio de la flota)

C = factor de emisión por escape, llantas y frenado, flota 1980

Valor de k

	g/VKT
PM-2.5 ^c	0.66
PM-10	4.6
PM-15	5.5
PM-30 ^d	24

Valor de C

	g/VMT
PM _{2.5}	0.1617
PM ₁₀	0.2119
PM ₁₅	0.2119
PM ₃₀ ^c	0.2119

Las emisiones generadas pueden corregirse por una mitigación natural, dada por los días de lluvia.

$$E_{ext} = \left[k \left(\frac{sL}{2} \right)^{0.65} \left(\frac{W}{3} \right)^{1.5} - C \right] \left(1 - \frac{P}{4N} \right)$$

Donde:

E_{ext} = factor de emisión por tamaño de particular con mitigación natural

P = número días con más de 0.254 mm de precipitación durante el periodo

N= número de días del periodo

6.1.5 Demolición

Durante la demolición se generan emisiones por el uso de maquinaria y vehículos, así como por el paso de los vehículos sobre los caminos. Sin embargo, de manera general, se puede mencionar que durante la construcción de vialidades, la demolición es mínima. Aún así, a continuación se describe su metodología de

²⁹ AP-42. Miscellaneous Sources 13.2.1. Paved Roads.

cálculo. Las PM₁₀ generadas por demolición se pueden estimar por medio de la siguiente ecuación, basada en el SCAQMD³⁰ (por sus siglas en inglés).

$$PM_{10} \text{ (libras/día)} = 0.00042 \text{ libras } PM_{10} / \text{ft}^3 * (N * O * P) / Q$$

Donde

N= ancho de la construcción (pies)

O = largo de la construcción (pies)

P = alto de la construcción (pies)

Q = número de días requeridos para la demolición

En particular, para el caso de la demolición de vialidades, la ecuación anterior se modifica a:

$$PM_{10} = (0.42 \text{ ton } PM_{10}/\text{acre-mes}) \times M \times f \times d$$

Donde

M = millas de vialidad construida

f = factor de conversión de millas a acres

d = duración de la construcción en meses

El cálculo de millas a acres es para obtener el ancho de la vialidad, por lo que se obtiene multiplicando el ancho de la vialidad por una milla, determinando así, el área afectada por la construcción de una milla de vialidad. Para esto, el Midwest Research Institute, desarrolló un factor de conversión por tipo de camino:

- Caminos interestatales y principales – 15.2 acres/milla
- Carreteras, vialidades rápidas y vialidad arterial – 12.7 acres/milla
- Colectores mayores (rural y urbano) – 9.8 acres/milla
- Colectores menores (rural y urbano) y caminos locales – 7.9 acres/milla

El factor de emisión incluye los efectos de supresión de polvos (como el humedecimiento de la tierra), que en general tienen un 50% de efectividad. Debido a que esta actividad genera viajes, para el cálculo del número de viajes realizados con base en el material transportado, se tiene la siguiente ecuación:

$$\text{Viaje por día} = \text{yd}^3 \text{ demolidas} / \text{días de demolición} * 0.25 * \text{viaje}/20 \text{ yd}^3$$

Se considera un viaje redondo de 20 millas y camiones de capacidad de 20 yardas cúbicas (URBEMIS, 2007).

³⁰ Air Quality Handbook 1993. California Environmental Quality Act (CEQA). South Air Coast Air Quality Management District's (SCAQMD's)

La demolición también genera viajes por los trabajadores y se asume que el número de trabajadores equivale al 125% del total de piezas del equipo de construcción, así como una mezcla de vehículos ligeros y pick up (50% y 50%), sin embargo, es conveniente estimar los kilómetros recorridos y velocidad reales.

6.1.6 Emisiones de la maquinaria

El cálculo de esta categoría de emisión se realiza por medio del modelo de cálculo OFFROAD2007 del California Air Resources Board (CARB por sus siglas en inglés). Por cada pieza de equipo utilizado, la ecuación general de emisiones por escape es:

$$E \text{ (lb/día)} = (\text{número de piezas})(\text{g/bhp/hr})(\text{hr/día})(\text{factor de carga})$$

Los factores de emisión y de carga por tipo de maquinaria y año, se pueden consultar en las hojas de cálculo del mismo modelo.

6.1.7 Emisiones por uso de pinturas

En esta categoría se tienen emisiones de gases orgánicos totales (GOT) por la evaporación de solventes de las pinturas y barnices. Se aplican límites de compuestos orgánicos volátiles contenidos en las pinturas, de acuerdo a la zona de construcción, cabe señalar que los factores utilizados son referidos a Estados Unidos; manejándose en general, 250 g COV/litro de pintura (URBEMIS, 2007).

La siguiente ecuación es utilizada para obtener un factor de emisión de gases orgánicos totales (GOT) o compuestos orgánicos volátiles (COV) por pie cuadrado.

$$\text{GOT (libras/ft}^2\text{)} = \text{g COV/l pintura} / 454 \text{ g/libra} * 3.785 \text{ l/galon} / 180 \text{ ft}^2\text{/galon}$$

En la ZMVM se cuenta con un máximo permisible de contenido de COV en las pinturas; por lo tanto, se considera conveniente sustituirlo en la ecuación anterior, considerando que todo el solvente se evapora como COV.

Con base en la NOM-123-ECOL-1998³¹, las pinturas arquitectónicas no deben de contener un máximo de 450 g COV/litro de pintura. Además, en caso de ser aplicados por aspersión (con pistola de aire), podrá contener un 10% más de disolvente activo.

Asimismo, en esta categoría de pintado, se deben estimar las emisiones generadas por los viajes asociados al personal, asumiendo que representan el 20% de los viajes de los trabajadores de la construcción.

6.1.8 Emisiones por asfaltado

Las emisiones generadas por la aplicación de asfalto se estiman con base en la siguiente ecuación del manual del SMAQMD³² (por sus siglas en inglés):

$$\text{COV (libras/día)} = (2.62 \text{ libras COV/acre}) * (\text{acres pavimentados/días de pavimentación})$$

Para los viajes realizados por los trabajadores en la aplicación de asfalto, se estima que el número de trabajadores representan el 125% del total de equipo de construcción utilizado, sin embargo, la longitud y velocidad de los viajes no está estimada, por lo que deben realizarse encuestas.

Otra forma de cálculo en la aplicación de asfalto, es con base en la composición del mismo. La evaporación de solventes durante la aplicación de asfalto, depende de la cantidad y del tipo de diluyente que se utiliza en la fabricación de la mezcla asfáltica. En la Planta de Asfalto del Gobierno del Distrito Federal, la mezcla es una combinación de asfalto AC20 (conocido como chapopote con un nivel de dureza 20) y de un triturado basáltico en una proporción de 6.5% y 93.5% respectivamente (SMA-GDF, 2010a).

³¹ Que establece el contenido máximo permisible de compuestos orgánicos volátiles (COV), en la fabricación de pinturas de secado al aire base disolvente para uso doméstico y los procedimientos para la determinación del contenido de los mismos en pinturas y recubrimientos.

³² Sacramento Metropolitan Air Quality Management District, 1994.

Por lo tanto, el cálculo de las emisiones cuando se cuenta con dichos datos, se realiza con la siguiente ecuación:

$$E = MA * \%A * \%DA * \%EV$$

Donde:

E= Emisión de COT [ton/año]

MA= Masa asfáltica distribuida en la zona de aplicación [ton/año]

%A= Por ciento en peso de asfalto en la mezcla [6.5%w]

%DA= Por ciento en peso del diluyente en el asfalto [0.34%w]

%EV= Evaporación del contenido de solvente como curado rápido [95%]

6.1.9 Balance de combustibles

El balance de materiales (también conocido como balance de masa), es un método utilizado para estimar las emisiones de algunas categorías, en donde se conoce el volumen y la composición química de los insumos utilizados. Para pronosticar algunas emisiones de procesos de combustión, se utiliza el balance de combustible, con base en la aplicación de las leyes de conservación de la materia.

La presencia de ciertos elementos en los combustibles puede usarse para predecir su presencia en las corrientes de emisión. Esto incluye elementos tóxicos tales como los metales que se encuentran en el carbón, así como el azufre que puede ser convertido en otros compuestos durante el proceso de combustión (SEMARNAT-INE-WGA, 2005).

En el caso de conocer el consumo de combustible utilizado en la obra, es posible estimar emisiones de ciertos contaminantes, como lo es el CO₂, SO₂, CH₄ y N₂O. La ecuación básica es la siguiente:

$$E = Q_{comb.} \times CCC \times \frac{MW_{CE}}{MW_{CC}}$$

Donde:

$Q_{comb.}$ = Consumo de combustible, flujo másico (p.ej., kg/hr)

CCC = Concentración del contaminante en el combustible

MW_{ce} = Peso molecular del contaminante emitido (lb/lb-mole)

MW_{cc} = Peso molecular del contaminante en el combustible (lb/lb-mole)

Cabe mencionar que el balance de combustible es un cálculo extra que se puede realizar además de los cálculos por actividad, lo cual puede ser un control de calidad de la estimación de emisiones y ayudar a dar certidumbre a los resultados.

Se considera que las metodologías descritas anteriormente son las posibles a utilizar en el cálculo de estimación de emisiones de la construcción de vialidades, cuando se conocen los datos necesarios a aplicar en cada una de ellas.

Asimismo, es importante destacar que durante la realización de las obras viales, el tráfico vehicular es mayor, por lo que además, sería necesario estimar las emisiones por la disminución de la velocidad en los tramos afectados. No obstante, para llevar a cabo esto es necesario contar con aforos vehiculares de las vialidades afectadas (antes, durante y después de la obra), lo cual es costoso y poco probable de obtener.

Capítulo 7 Emisiones de la construcción de vialidades en la ZMVM

7.1 Selección de un método óptimo de estimación de emisiones de la construcción de vialidades

Una vez descritas las metodologías de estimación de emisiones de la construcción en cada una de sus fases y/o actividades, se prosiguió a la búsqueda de alguna metodología o modelo, que estimara de manera específica, las emisiones de la construcción de vialidades; considerando en primer término, que la propuesta de cálculo va dirigida a personal que no está relacionado con la actividad de la construcción y, en segundo lugar, que las metodologías descritas anteriormente, requieren de una gran cantidad de información meteorológica y del sitio.

Se revisaron varios modelos de estimación de emisiones, los cuales se describen brevemente:

- URBEMIS (*Urban Land Use Emissions Model*). Modelo de estimación de emisiones para el desarrollo de proyectos de uso de suelo de algunos lugares de California (USA); incluye emisiones de la construcción, vehiculares y la posibilidad de seleccionar medidas de mitigación.
- eMISSIONS (*Greenhouse Gas Strategy Software*). Modelo para estimar emisiones de gases de efecto invernadero y diseñar escenarios, también cuantifica la reducción de emisiones por cambios de combustible y detecta cuanto se debe reducir y en que categorías de emisión, con base en los escenarios dados. El software utiliza metodologías de cálculo del IPCC.
- GBTOOL (*Green Building Tool*). Software de cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero, considerando la actividad industrial. No estima emisiones de la actividad de la construcción.
- BEES (*Building for Environmental and Economic Sustainability*), software de análisis del ciclo de vida de varios productos entre ellos los de la construcción, considerando los costos económicos y ambientales. Se analizan varias etapas

del producto, como es la adquisición de material, manufactura, transportación, instalación, desechos, entre los principales.

- OFFROAD2007 (Off road). Alternativa para cálculo de emisiones de fuentes móviles no carreteras (maquinaria y equipo), utiliza factores de emisión por tipo de equipo, tomando en consideración la potencia y tamaño de los mismos, puede hacer estimaciones hasta el año 2020.
- EMFAC2007 (Emission factors). Modelo de cálculo para inventarios de emisiones vehiculares de California (USA).
- RoadConstructionModel (Road Construction Emissions Model Ver. 6.3.2). Modelo de cálculo que estima la emisiones generadas por la actividad de la construcción, se pueden usar datos de entrada por defecto o en caso de contar con datos locales, estos pueden ser alimentados directamente. Estima emisiones de GOT, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5} y CO₂, por etapa de construcción, además de las emisiones de escape de la maquinaria y equipos, así como emisiones fugitivas de polvo. Desarrollada por el Gobierno de Sacramento, California³³.

En general, los modelos antes descritos utilizan las mismas bases de información y metodologías de la U.S. EPA, en lo que se refiere a factores de emisión y datos de actividad.

Una vez analizados los modelos anteriores y tomando en consideración que el *RoadConstructionModel* es específico para estimar emisiones de la construcción de vialidades, y que puede ser utilizado detalladamente si se cuenta con información puntualizada de la obra vial; se decidió utilizar dicho modelo para calcular las emisiones de las vialidades de la ZMVM.

Además, el *RoadConstructionModel* es recomendado por algunas instancias gubernamentales como la U. S. EPA y el CARB (California Air Resources Board), para evaluación de proyectos de construcción de vialidades.

³³ Sacramento Metropolitan Air Quality Management District, California Department of Transportation, the California Air Resources Board, the U.S. EPA, Jones & Stokes and Rimpco and Associates, Inc.

A continuación, la Figura 7.1 y Figura 7.2 muestran parte de la información de entrada y de salida del *RoadConstructionModel*.

Road Construction Emissions Model		Version 6.3.2	
Data Entry Worksheet			
<p>Note: Required data input sections have a yellow background. Optional data input sections have a blue background. Only areas with a yellow or blue background can be modified. Program defaults have a white background. The user is required to enter information in cells C10 through C25.</p>			
Input Type			
Project Name	Rio Remedios		Clear Data Input & User Overrides
Construction Start Year	2008	Enter a Year between 2005 and 2025 (inclusive)	
Project Type	3	1 New Road Construction 2 Road Widening 3 Bridge/Overpass Construction	To begin a new project, click this button to clear data previously entered. This button will only work if you opted not to disable macros when loading this spreadsheet.
Project Construction Time	18.0	months	
Predominant Soil/Site Type: Enter 1, 2, or 3	1	1. Sand Gravel 2. Weathered Rock-Earth 3. Blasted Rock	
Project Length	3.729.02	miles	
Total Project Area	56.3	acres	
Maximum Area Disturbed/Day	0.1	acres	
Water Trucks Used?	1	1. Yes 2. No	
Soil Imported	2816.9	yd ³ /day	
Soil Exported	33392.1	yd ³ /day	
Average Truck Capacity	28.1	yd ³ (assume 20 if unknown)	

Figura 7.1 Ejemplo de información de entrada del *RoadConstructionModel*

Emission Estimates for -> Rio Remedios										
Project Phases (English Units)	ROG (lbs/day)	CO (lbs/day)	NOx (lbs/day)	PM10 (lbs/day)	PM10 (lbs/day)	PM10 (lbs/day)	PM2.5 (lbs/day)	PM2.5 (lbs/day)	PM2.5 (lbs/day)	CO2 (lbs/day)
Grubbing/Land Clearing	656,747.2	64,260.8	168,200.0	7,573.4	7,572.1	1.3	6,964.4	6,964.1	0.3	16,909,067.3
Grading/Excavation	215.4	2,550.1	1,539.9	64.3	63.0	1.3	52.9	52.6	0.3	202,303.0
Drainage/Utilities/Sub-Grade	32.6	452.1	39.9	5.9	4.6	1.3	2.2	2.0	0.3	41,957.8
Paving	106.9	423.5	35.9	3.8	3.8	-	1.9	1.9	-	208,627.4
Maximum (pounds/day)	656,747.2	64,260.8	168,200.0	7,573.4	7,572.1	1.3	6,964.4	6,964.1	0.3	16,909,067.3
Total (tons/construction project)	13,026.1	1,518.5	3,456.3	155.6	155.4	0.2	142.3	142.3	0.0	359,943.8
Notes: Project Start Year -> 2008 Project Length (months) -> 18 Total Project Area (acres) -> 56 Maximum Area Disturbed/Day (acres) -> 0 Total Soil Imported/Exported (yd ³ /day) -> 36209										
PM10 and PM2.5 estimates assume 50% control of fugitive dust from watering and associated dust control measures if a minimum number of water trucks are specified. Total PM10 emissions shown in column F are the sum of exhaust and fugitive dust emissions shown in columns H and I. Total PM2.5 emissions shown in Column J are the sum of exhaust and fugitive dust emissions shown in columns K and L.										

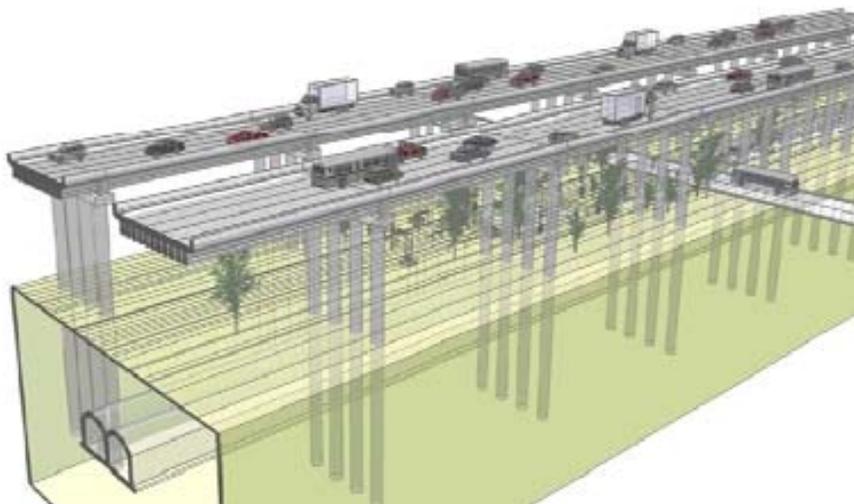
Figura 7.2 Ejemplo de información de salida del *RoadConstructionModel*

7.2 Estimación de emisiones de la construcción de vialidades

Para el cálculo de emisiones de la construcción de vialidades en la Zona Metropolitana del Valle de México, se estableció el periodo de 2007 a 2009, con la finalidad de utilizar, en la medida de lo posible, obras completas o que al menos hayan realizado diferentes actividades de construcción en alguno de sus tramos (limpieza, excavación, nivelación, construcción, entre otras).

En la ZMVM, durante 2007 a 2009 se realizaron 374 km de obras viales, con una superficie estimada de 3 millones de m² en 16 obras viales (Tabla 5.8). En el caso de que la vialidad no estuviera concluida en ese periodo, se estimó la longitud de vialidad, con base en el porcentaje de avance reportado en dicha obra.

Como ejemplo de cálculo para la aplicación detallada del *RoadConstructionModel*, se seleccionó la obra *Los Remedios – Ecatepec* en su primera etapa de 6 km, tramo finalizado Puente de Vigas - Calzada Vallejo, considerando que de dicha obra se tiene información desglosada y real de la construcción. Cabe mencionar que el *RoadConstructionModel* puede ser utilizado aún cuando se tiene información mínima de las vialidades, sin embargo, las emisiones no serían las reales.



Fuente: VIABILIS, 2006
Primer tramo 6 km, sobre embovedado del Río Los Remedios

Figura 7.3 Los Remedios-Ecatepec

Tabla 7.1 Longitud y superficie estimada de 2007 a 2009

Vialidad	Longitud Total (km)	Longitud** construida (km)	Superficie* construida (m ²)
1. Metrobus Insurgentes	9.2	9.2	4,594.0
2. B1: Tacubaya - Tepalcates	21	21.0	176,620.0
3. Calles Centro histórico	218.9	218.9	151,823.0
4. Corredor Constituyentes	2.1	2.1	14,732
5. Anillo Periférico-Centenario	2.1	1.2	25,473.8
6. Circuito Interior	41.6	41.6	1,512,000.0
7. Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo Metro	25.1	3.5	49,056.0
8. Eje Troncal Metropolitano (Ciudad Azteca a Xochimilco)	35.0	5.0	69,972.0
9. Circuito Exterior Mexiquense	152.7	7.0	98,000.0
10. Viaducto elevado Bicentenario	32.0	11.6	122,264.6
11. Sistema TransMexiquense Bicentenario Línea METROMEX Ciudad Azteca – Tecámac	16.0	3.0	31,500.0
12. Ampliación de la carretera Chalco-Tláhuac y Chalco-Huitzilzingo	14.5	14.5	203,000.0
13. Ampliación de la carretera Tecámac-Zumpango	1.2	1.2	16,800.0
14. Proyecto del Tren Suburbano Buenavista-Cuautitlán-Huehuetoca	47.0	27.0	283,500.0
15. Anillo Periférico en el arco oriente	2.7	1.1	24,715.8
16. Los Remedios - Ecatepec	24.2	6.0	228,000
Total	645.3	373.9	3,012,051.2

* La superficie construida 2007-2009, se estimó con base en el número de carriles.

** La longitud construida en las obras no finalizadas durante 2007-2009, se estimó con base en el porcentaje de avance.

La obra seleccionada como ejemplo de cálculo *Los Remedios-Ecatepec* (Figura 7.4), se estimó de manera detallada, con la información que a continuación se describe.

El proyecto “Vialidad Río de los Remedios” consiste en la construcción y operación de una carretera de cuota, que comunicará el norte de la ciudad de México desde puente de Vigas hasta el aeropuerto de la Ciudad de México, a través de su enlace con la carretera Peñón Texcoco (VIABILIS, 2006). Consta de dos partes:

1. El embovedado del Río de los Remedios para garantizar el uso del derecho de vía de ese cuerpo de agua. El proyecto de embovedado del Río de los Remedios consiste en la construcción de dos canales rectangulares contiguos de 4.00 m y 4.25 m de ancho y 2.5 m de altura, cubiertos por una bóveda en arco cuya flecha al centro es de 1.00 m y 1.06 m respectivamente. El tramo ya embovedado es de Puente de Vigas a Calzada Vallejo (≈6 km).

2. La segunda parte de la obra es la construcción de una vía rápida que comunique y resuelva los actuales problemas de tránsito lento y pesado. La construcción consiste en una vía principal de seis carriles, con tres carriles por sentido en un tramo aproximado de 25 km; inicia en el Vaso de Cristo en Naucalpan, hasta entroncar con la carretera Peñón-Texcoco.



Figura 7.4 Imágenes de la construcción de la vialidad los Remedios-Ecatepec

Las características generales de la obra para el cálculo de emisiones son:

- Longitud total: 6 km
- Ancho de la corona: 14.00 m
- Acotamiento: Interior 1.00 m, exterior 2.50 m
- Pendientes máximas y mínimas: 6% - 1%
- Ancho de la calzada: 38.00 m
- Pavimento: concreto hidráulico y asfalto
- Velocidad máxima permitida: 90 km/hr
- Grado de curvatura: variable

Además de los datos anteriores, para el cálculo de emisiones se utilizó la siguiente información (VIABILIS, 2010):

- Suelo importado: 964,334 m³
- Suelo exportado: 11,488,547 m³
- Pintura y solventes: 17,075 litros
- Asfalto: 211,147 m³
- Combustibles: gasolina - 151,595 litros
diesel - 4,097,491 litros
- Arena abrasiva: 15.8 m³
- Maquinaria pesada: 312,070 horas
- Camiones (varios): 19,826 horas
- Agua: 107,930 m³

Las 15 vialidades restantes de la Tabla 5.8 se estimaron de manera individual, considerando sus dimensiones (longitud y superficie), y se tomaron los valores por defecto del *RoadConstructionModel*, en lo que se refiere a maquinaria y equipo, ya que sólo se obtuvo información descriptiva muy general de dichas obras.

Asimismo, para estas obras, y con base en la maquinaria estimada por el *RoadConstructionModel*, se calcularon los kilómetros recorridos por los equipos, con la finalidad de obtener emisiones generadas en caminos no pavimentados.

En algunas obras que se reporta SO₂, CH₄ y N₂O, fueron emisiones estimadas a través de balance de combustible, con información reportada en las manifestaciones de impacto ambiental respectivas.

7.2.1 Emisiones de la vialidad Los Remedios-Ecatepec

Para la vialidad *Los Remedios-Ecatepec* en su primer tramo, Puente de Vigas a Calzada Vallejo (6 km), se obtuvieron las siguientes emisiones a la atmósfera, con la aplicación del *RoadConstructionModel* y algunas metodologías de la US-EPA (Tabla 7.2).

Tabla 7.2 Emisiones generadas por la obra vial Los Remedios-Ecatepec [ton/año]

Actividad de emisión ¹	PM ₁₀ ⁺	PM _{2.5} ⁺	SO ₂ [*]	CO	NOx	COV	CO ₂ [*]	CH ₄ [*]	N ₂ O [*]
Limpieza y preparación	0.5	0.4	0.2	12.6	8.5	30.5	1,972.5	0.1	0.0
Nivelación/Excavación	6.6	5.6	0.8	220.2	156.5	136.8	20,997.0	0.3	0.1
Drenajes/Obras utilitarias	1.6	1.3	0.7	42.5	29.6	106.6	6,897.8	0.3	0.1
Pavimentación	0.6	0.5	0.3	17.5	12.5	48.0	8,070.1	0.1	0.0
Pintura**						8.5			
Aplicación de asfalto**						662.0			
Caminos no pavimentados**	171.1	17.1							
Abrasivos**	544.6	54.5							
Carga y descarga de material**	0.4	0.1							
Total (ton/construcción)	725	79	2	293	207	992	37,937	0.7	0.2

¹ Durante el primer tramo de 6 km de vialidad, sobre el embovedado del Río Los Remedios.

Los valores totales pueden variar por el redondeo de cifras.

* Emisiones estimadas por balance de combustible.

** Emisiones estimadas individualmente con metodología de la US-EPA.

+ Las emisiones consideran un 50% de reducción de emisiones por la aplicación de agua durante la obra.

Debido a que las partículas son uno de los contaminantes que la mayor parte del año se encuentra fuera de norma en la ZMVM, la Tabla 7.3 presenta de manera desglosada, las emisiones de partículas fugitivas y las generadas por el escape de la maquinaria y equipo, en la vialidad *Los Remedios-Ecatepec*. Cabe mencionar que el RoadConstructionModel proporciona emisiones de partículas, asumiendo un 50% de reducción por la utilización de agua (Figura 7.5 - Figura 7.7).

Tabla 7.3 Emisiones de partículas por la obra vial Los Remedios-Ecatepec [ton/año]

Actividad de emisión ¹	Escape PM ₁₀	Fugitivas PM ₁₀	Total PM ₁₀	Escape PM _{2.5}	Fugitivas PM _{2.5}	Total PM _{2.5}
Limpieza y preparación	0.4	0.0	0.5	0.4	0.0	0.4
Nivelación/Excavación	6.5	0.1	6.6	5.6	0.0	5.6
Drenajes/Obras utilitarias	1.5	0.1	1.6	1.2	0.0	1.3
Pavimentación	0.6	0.0	0.6	0.5	0.0	0.5
Caminos no pavimentados		171.1	171.1		17.1	17.1
Abrasivos		544.6	544.6		54.5	54.5
Carga y descarga de materia		0.4	0.4		0.1	0.1
Total (ton/construcción)	9.1	716.3	725.0	7.7	71.7	79.4

¹ Durante el primer tramo de 6 km de vialidad, sobre el embovedado del Río Los Remedios
Las emisiones consideran un 50% de reducción de emisiones por la aplicación de agua durante la obra



Figura 7.5 Mitigación de emisiones de partículas



Carga de material



Descarga de material



Caminos no pavimentados



Caminos pavimentados y no pavimentados



Tránsito de la maquinaria sobre los caminos no pavimentados

Figura 7.6 Ejemplo de actividades generadoras de partículas



Figura 7.7 Ejemplo de maquinaria utilizada en la vialidad los Remedios-Ecatepec

7.2.2 Emisiones de otras 15 obras viales de la ZMVM

Además de las emisiones de la vialidad *Los Remedios-Ecatepec*, la Tabla 7.4. presenta las emisiones de las 15 obras viales que se estimaron sólo con base en sus dimensiones (longitud y superficie), a través del *RoadConstructionModel*.

Tabla 7.4 Emisiones de 15 obras viales en la ZMVM, durante 2007-2009 [ton/año]

Vialidad	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂ *	CO	NO _x	COV	CO ₂	CH ₄ *	N ₂ O*
1. Metrobus Insurgentes	3.2	0.3	0.8	5.2	9.1	1.6	4,414.0*	0.3	0.1
2. B1: Tacubaya - Tepalcates	3.2	0.9	0.2	8.0	10.5	2.9	917.0	0.2	0.0
3. Calles Centro histórico	19.5	0.8	N/E	139.4	139.0	57.5	13,062.1	N/E	N/E
4. Corredor Constituyentes	1.6	0.2	N/E	2.3	4.3	0.6	352.0	N/E	N/E
5. Anillo Periférico-Centenario	5.8	0.6	N/E	5.4	10.5	1.4	866.9	N/E	N/E
6. Circuito Interior	4.7	6.3	N/E	12.6	15.0	4.9	1,337.6	N/E	N/E
7. Línea 12 del SCM	2.6	0.5	N/E	3.4	6.0	1.0	516.9	N/E	N/E
8. Eje Troncal Metropolitano	2.6	0.3	N/E	4.1	7.1	1.2	595.2	N/E	N/E
9. Circuito Exterior Mexiquense	4.9	0.6	N/E	8.2	13.1	2.6	1,114.0	N/E	N/E
10. Viaducto elevado Bicentenario	2.4	0.6	N/E	5.7	8.4	1.9	747.4	N/E	N/E
11. Sistema TransMexiquense Bicentenario METROMEX	1.8	0.3	N/E	1.1	2.1	0.3	168.4	N/E	N/E
12. Ampliación de la carretera Chalco-Tláhuac	1.8	1.4	N/E	3.8	5.4	1.3	461.1	N/E	N/E
13. Ampliación de la carretera Tecámac-Zumpango	0.8	0.3	N/E	1.0	1.9	0.3	154.7	N/E	N/E
14. Suburbano Buenavista-Cuautitlán-Huehuetoca	4.6	0.8	N/E	13.9	17.4	5.2	1,546.1	N/E	N/E
15. Anillo Periférico en el arco oriente	5.5	0.6	N/E	5.2	10.2	1.3	846.4	N/E	N/E
Total	65.0	14.4	1	219.4	259.9	84.0	27,099.8	0.5	0.1

* Emisiones estimadas por balance de combustible

N/E No Estimado

** Las partículas incluyen emisiones generadas en caminos por el tránsito de la maquinaria, estimadas con metodología de la US-EPA.

La tabla anterior incluye emisiones de partículas generadas en los caminos por el paso de la maquinaria. Debido a que el dato de actividad para el cálculo de emisiones en los caminos son los kilómetros recorridos, para estimarlos se utilizaron las horas trabajadas por la maquinaria (provenientes del *RoadConstructionModel*) y una velocidad promedio de 5 km/hr (ver siguiente ecuación).

$$\text{KRM} = \text{hr}_{\text{maquina}} * \text{velocidad}$$

Donde:

KRM = kilómetros recorridos por la maquinaria

hr_{maquina} = horas trabajadas por la maquinaria (estimadas con el *RoadConstructionModel*)

velocidad = 5 km/hr

7.2.3 Emisiones de totales por la construcción de vialidades en la ZMVM

En conjunto (Tabla 7.2 y Tabla 7.4), por la actividad de la construcción de vialidades en el periodo de 2007 a 2009 en la ZMVM, se estimaron las siguientes emisiones:

Tabla 7.5 Emisiones totales de la construcción de vialidades en la ZMVM [ton/año]

Tipo de obra	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NOx	COV	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Los Remedios –Ecatepec	725	79	2	293	207	992	37,937	0.7	0.2
Otras obras viales (15)	65.0	14.4	1.0	219.4	259.9	84.0	27,099.8	0.5	0.1
Total	790	93	3.0	512	467	1,076	65,037	1.2	0.4

Las sumas pueden variar en decimales por el redondeo de cifras.

Capítulo 8 Análisis y discusión de resultados

Los inventarios de emisiones de contaminantes criterio y de gases de efecto invernadero de la ZMVM, incluyen las emisiones de 52 categorías distribuidas en cuatro tipos de fuentes (industria, área, móviles y naturales). La categoría de construcción es una categoría que pertenece a las fuentes de área y que no se incluye en los Inventarios, aún cuando es un importante generador de contaminantes, entre los que destacan las emisiones de partículas.

Asimismo, debido a que en años recientes la construcción de vialidades ha tenido un importante auge, como parte de las mejoras de la Ciudad y el desarrollo de un transporte sustentable, se considero pertinente evaluar las emisiones de la construcción de vialidades como una sub-categoría de la actividad de la construcción y, con base en ello, establecer si es una categoría *clave* en los Inventarios de Emisiones.

Con base en las metodologías de cálculo de emisiones del IPCC³⁴, las categorías *clave* en las fuentes de emisión, son aquellas que quedan incluidas dentro del 95% de las emisiones, lo cual se realiza para cada contaminante (IPCC, 2000).

En esta sección se presenta un análisis de los resultados obtenidos y la estimación de escenarios de emisiones, los cuales nos proporcionarán una evaluación más amplia de las emisiones de la construcción de vialidades. Asimismo, se muestra la estimación de la incertidumbre de los escenarios propuestos, con la finalidad de validar el cálculo de emisiones.

De manera general, los escenarios de emisiones son una forma de exponer alternativas en la aplicación y evaluación de emisiones. Asimismo, el cálculo de la incertidumbre de dichos escenarios nos ayuda a orientar las decisiones de evaluación y aplicación de metodologías.

³⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories.

Cabe destacar que en fechas recientes, esta forma de validación de los cálculos es utilizada por instancias nacionales e internacionales en materia ambiental; en particular, son metodologías recomendadas por el IPCC.

8.1 Obtención de factores de emisión por contaminante

Analizando los resultados anteriores, se puede decir que las emisiones están subestimadas, ya que en conjunto, las 15 obras viales presentan emisiones muy por debajo de la vialidad utilizada como ejemplo *Los Remedios –Ecatepec*, en la cual se consideraron datos reales de materiales, maquinaria y combustible; y no sólo las dimensiones de la vialidad.

Debido a lo anterior, se procedió a obtener un factor de emisión por m² de cada uno de los contaminantes evaluados, con base en las emisiones de la vialidad *Los Remedios–Ecatepec*. Los factores obtenidos se utilizaron para volver a estimar las emisiones de las 15 obras viales, utilizando la superficie respectiva en cada una de ellas. Los factores de emisión obtenidos para cada contaminante se muestran en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1 Factores de emisión para construcción de vialidades tipo puente (kg/m²)

PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NOx	COV	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
3.18	0.35	0.009	1.29	0.91	4.35	166.4	0.003	0.001

Obtenidos con las emisiones de la vialidad los *Los Remedios –Ecatepec – Tipo puente*

Ahora bien, para la aplicación de los factores de emisión antes expuestos, será necesario tener en cuenta algunas consideraciones:

- Los factores se estimaron con una vialidad que utilizó una pavimentación mixta de concreto y asfalto, para una mejor calidad del factor de COV, es conveniente conocer la superficie asfaltada y la pavimentada con concreto.
- La vialidad está clasificada como puente; por lo cual, los factores serían válidos sólo para éste tipo de construcciones.
- Debido a que las horas de maquina no se tuvieron por etapa de construcción, no fue posible obtener un factor de emisión por etapa, lo cual serían más aceptable, considerando que las emisiones contaminantes no son iguales en todas las etapas de la construcción.

- Existen actividades que varían de acuerdo al volumen de material, por lo cual, algunos factores de emisión pueden estar subestimados o sobreestimados, de acuerdo al tipo de obra.
- Es conveniente contar con otros ejemplos de cálculo a detalle, con la finalidad de obtener factores de emisión de otros tipos de vialidades, que no sean consideradas puentes.

8.2 Elaboración de escenarios de emisión

Tomando en cuenta las consideraciones para la aplicación de los factores de emisión estimados, se propusieron tres escenarios de emisión de la construcción de vialidades, toda vez que las emisiones estimadas se consideran subestimadas para la construcción de vialidades y para dar certeza a los cálculos realizados.

En dichos escenarios se combinan las emisiones del ejemplo de cálculo, las emisiones de las vialidades estimadas con base en sus dimensiones y las emisiones calculadas con los factores de emisión por m² (generados con la vialidad *Los Remedios–Ecatepec*). A continuación se describe cada escenario:

- **Escenario inicial (RoadConstructionModel).**
Son las emisiones iniciales estimadas en el capítulo anterior (Tabla 7.5).
 - Incluye las emisiones *Los Remedios–Ecatepec* (Tabla 7.2).
 - Además de las 15 obras restantes, estimadas con base en sus dimensiones.
 - Se considera un escenario subestimado, ya que las emisiones de las 15 vialidades, resultan estar muy por debajo de las emisiones del ejemplo.
- **Escenario combinado (RoadConstructionModel y factor de emisión de Los Remedios–Ecatepec).**
Es una combinación de las emisiones de *Los Remedios–Ecatepec* y de vialidades estimadas con factor de emisión.
 - Contiene las emisiones del ejemplo de cálculo *Los Remedios–Ecatepec*.
 - Se consideran las emisiones de 6 obras viales tipo puente, estimadas con los factores de emisión por m² de la vialidad *Los Remedios–Ecatepec*.
 - Incluye las emisiones de las 9 obras viales restantes (ampliaciones, reencarpetamiento o vialidades nuevas), estimadas con base en sus dimensiones a través del RoadConstructionModel.

- **Escenario homogéneo (factor de emisión *Los Remedios–Ecatepec*).**
Escenario calculado con factores de emisión por m², provenientes de las estimaciones de Los Remedios –Ecatepec (Tabla 8.1).
 - Considera las emisiones originales de *Los Remedios–Ecatepec*.
 - Incluye las 15 obras viales restante, estimadas con el factor de emisión por m² de *Los Remedios–Ecatepec*.
 - Se establece como un escenario homogéneo y de máxima emisión, ya que se asume que todas las obras son del mismo tipo de construcción.

A continuación, en la Tabla 8.2 se presentan las emisiones de los tres escenarios propuestos, los cuales serán incluidos en los inventarios de emisiones de contaminantes criterio y de gases de efecto invernadero, para evaluar la contribución de emisiones de la construcción de vialidades en dichos documentos.

Tabla 8.2 Escenarios de emisiones por la construcción de vialidades

Escenario	Emisiones anuales [ton /año]								
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NOX	COV	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Inicial	395	47	1	256	233	538	32,518	0.6	0.2
Combinado	835	95	3	426	342	1,149	53,248	1.0	0.3
Homogéneo	5,151	564	14	2,082	1,471	7,049	269,557	5.2	1.8

8.3 Evaluación de escenarios de emisión

Considerando que la finalidad de este documento es evaluar las emisiones de la construcción de vialidades, para justificar si es una categoría *clave* que debe ser incluida en los inventarios de emisiones, es decir, que forme parte del 95% de las emisiones totales por contaminante, se realizaron dos actividades:

- Se incluyó cada escenario en el inventario de emisiones de contaminantes criterio y de GEI.
- Se determinó si la actividad de la construcción de vialidades se ubica dentro del 95% de las emisiones totales de cada contaminante (PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO, NOx, COV y CO₂).

A continuación se presenta la línea base de las emisiones, la cual corresponde a los Inventarios de Emisiones 2008. Además se muestran los inventarios de emisiones, incluyendo cada escenario de la construcción de vialidades y determinado en cada uno de ellos, si dicha actividad es fuente *clave* en la estimación de emisiones.

Tabla 8.3 Inventario de emisiones de la ZMVM 2008 – Línea base

Sector	Emisiones [ton /año]								
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NOX	COV	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Fuentes Puntuales	4,986	859	3,375	6,961	20,094	129,178	14,805,764	351	53
Fuentes de Área	14,678	1,643	23	9,263	12,043	241,252	6,672,779	287,666	36
Fuentes Móviles	3,902	2,849	3,306	1,552,204	154,919	185,384	22,290,505	3,080	1,411
Fuentes Naturales	730	148	N/A	N/A	1,031	35,585	N/A	N/A	N/A
Total	24,296	5,499	6,704	1,568,428	188,087	591,399	43,769,048	291,097	1,500

Fuente: SMA-GDF, 2010a y SMA-GDF, 2010b

A partir de la línea base (Tabla 8.3), se incluyeron las emisiones de la construcción de vialidades del *escenario inicial*. Se observó que las partículas son contaminantes que quedan dentro del 95% de las emisiones totales respectivas, es decir, con dicho escenario (Tabla 8.4), la construcción de vialidades es una categoría *clave*, que debe ser incluida en los Inventario de Emisiones de la ZMVM, además de que las partículas son contaminantes que varias veces al año rebasan su norma ambiental.

Tabla 8.4 Inventario de emisiones de la ZMVM 2008 - Escenario inicial

Sector	Emisiones [ton /año]								
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NOX	COV	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Fuentes Puntuales	4,986	859	3,375	6,961	20,094	129,178	14,805,764	351	53
Fuentes de Área	15,073	1,690	24	9,519	12,276	241,790	6,705,297	287,666	36
Fuentes Móviles	3,902	2,849	3,306	1,552,204	154,919	185,384	22,290,505	3,080	1,411
Fuentes Naturales	730	148	N/A	N/A	1,031	35,585	N/A	N/A	N/A
Total	24,691	5,546	6,705	1,568,684	188,320	591,937	43,801,566	291,097	1,500

*Las emisiones de N₂O por la construcción de vialidades dentro de las fuentes de área no son significativas.

A partir del *escenario inicial*, la Tabla 8.5 y Tabla 8.6 presentan la posición que ocupan las partículas de la construcción de vialidades en el inventario de emisiones y además, se presenta el porcentaje de contribución a las emisiones respectivas de la ZMVM. Se puede observar que las PM₁₀, se ubican como la categoría número 11 de mayor emisión y las PM_{2.5} como la categoría 19 de más emisión.

Tabla 8.5 Contribución y posición de PM₁₀ de la construcción de vialidades del Escenario inicial

Sector	% contribución	Posición
Caminos sin pavimentar	46.14	1
Caminos pavimentados	10.84	2
Tractocamiones	5.86	3
Productos minerales no metálicos	5.69	4
Autos particulares	3.88	5
Productos alimenticios, bebidas y tabaco	3.50	6
Productos metálicos, maquinaria y equipo	3.32	7
Sustancias químicas, productos derivados del petróleo y del carbón, de hule y de plástico	3.16	8
Erosión eólica del suelo	2.94	9
Vehículos de carga mayores a 3 ton.	2.18	10
Construcción de vialidades	2.17	11
Textiles, prendas de vestir e industria del cuero	1.88	12
Autobuses	1.57	13
Combustión habitacional	1.03	14
Generación de energía eléctrica	0.79	15
	95 % de emisiones	

Tabla 8.6 Contribución y posición de PM_{2,5} de la construcción de vialidades de Escenario inicial

Sector	% contribución	Posición
Tractocamiones	21.96	1
Caminos sin pavimentar	20.52	2
Autos particulares	9.21	3
Vehículos de carga mayores a 3 ton.	7.99	4
Autobuses	6.09	5
Productos minerales no metálicos	5.09	6
Combustión habitacional	4.63	7
Generación de energía eléctrica	3.55	8
Erosión eólica del suelo	2.67	9
Incendios forestales	1.73	10
Taxis	1.73	11
Sustancias químicas, productos derivados del petróleo	1.64	12
Vehículos de carga de hasta 3 ton.	1.53	13
Papel y productos de papel, imprenta y editoriales	1.35	14
Productos alimenticios, bebidas y tabaco	1.30	15
Productos metálicos, maquinaria y equipo	1.28	16
Combustión comercial/institucional	1.05	17
Motocicletas	0.96	18
Construcción de vialidades	0.84	19
	95 % de emisiones	

Al incorporar las emisiones de la construcción de vialidades del *escenario combinado* (Tabla 8.7) en el Inventario de Emisiones 2008, se obtuvo, al igual que en el *escenario inicial*, que las partículas son los únicos contaminantes que quedan dentro del 95% de las emisiones totales respectivas.

Tabla 8.7 Inventario de emisiones de la ZMVM 2008 - Escenario combinado

Sector	Emisiones [ton /año]								
	PM ₁₀	PM _{2,5}	SO ₂	CO	NOX	COV	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Fuentes Puntuales	4,986	859	3,375	6,961	20,094	129,178	14,805,764	351	53
Fuentes de Área	15,513	1,738	26	9,689	12,385	242,401	6,726,027	287,667	36
Fuentes Móviles	3,902	2,849	3,306	1,552,204	154,919	185,384	22,290,505	3,080	1,411
Fuentes Naturales	730	148	N/A	N/A	1,031	35,585	N/A	N/A	N/A
Total	25,131	5,594	6,707	1,568,854	188,429	592,548	43,822,296	291,098	1,500

*Las emisiones de N₂O por la construcción de vialidades no son significativas

Por lo tanto, con el *escenario combinado*, la construcción de vialidades es una categoría susceptible de ser incluida en los Inventarios de Emisiones, ya que además, las partículas del aire son un problema ambiental y de salud en la ZMVM.

Cabe mencionar que la actividad de la construcción de vialidades aquí evaluada, solo es una sub-categoría de la construcción, por lo que al evaluarse las emisiones de la construcción en general, se obtendría que es una categoría de mayor peso en las emisiones de partículas.

Con este *escenario combinado*, las partículas suben de posición, es decir, para el caso de las PM₁₀, pasa de ser la categoría número once a ser la categoría siete en emisiones (Tabla 8.8). En lo que respecta a las PM_{2.5}, pasa de ser la categoría diecinueve a ser la número doce en emisiones (Tabla 8.9).

A continuación se presenta la posición de las partículas de la construcción de vialidades en el Inventario de Emisiones con el *escenario combinado*, así como su porcentaje de contribución a las emisiones totales respectivas.

Tabla 8.8 Contribución y posición de PM₁₀ de la construcción de vialidades del Escenario combinado

Sector	% contribución	Posición
Caminos sin pavimentar	45.60	1
Caminos pavimentados	10.72	2
Tractocamiones	5.79	3
Productos minerales no metálicos	5.63	4
Autos particulares	3.83	5
Productos alimenticios, bebidas y tabaco	3.46	6
Construcción de vialidades	3.32	7
Productos metálicos, maquinaria y equipo	3.28	8
Sustancias químicas, productos derivados del petróleo y del carbón, de hule y de plástico	3.12	9
Erosión eólica del suelo	2.90	10
Vehículos de carga mayores a 3 ton.	2.15	11
	95 % de emisiones	

Tabla 8.9 Contribución y posición de PM_{2.5} de la construcción de vialidades del Escenario combinado

Sector	% contribución	Posición
Tractocamiones	21.77	1
Caminos sin pavimentar	20.34	2
Autos particulares	9.14	3
Vehículos de carga mayores a 3 ton.	7.92	4
Autobuses	6.04	5
Productos minerales no metálicos	5.04	6
Combustión habitacional	4.59	7
Generación de energía eléctrica	3.52	8
Erosión eólica del suelo	2.65	9
Incendios forestales	1.72	10
Taxis	1.72	11
Construcción de vialidades	1.69	12
Sustancias químicas, productos derivados del petróleo y del carbón, de hule y de plástico	1.63	13
Vehículos de carga de hasta 3 ton.	1.52	14
Papel y productos de papel, imprenta y editoriales	1.34	15
Productos alimenticios, bebidas y tabaco	1.29	16
Productos metálicos, maquinaria y equipo	1.27	17
Combustión comercial/institucional	1.04	18
Motocicletas	0.95	19
	95 % de emisiones	

Finalmente, al complementar el Inventario de Emisiones 2008 con las emisiones de la construcción de vialidades del *escenario homogéneo* (Tabla 8.10), se obtuvo que las partículas y los compuestos orgánicos volátiles, son contaminantes que quedan incluidos en el 95% de las emisiones respectivas.

Tabla 8.10 Inventario de emisiones de la ZMVM 2008 - Escenario homogéneo

Sector	Emisiones [ton /año]								
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NOX	COV	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Fuentes Puntuales	4,986	859	3,375	6,961	20,094	129,178	14,805,764	351	53
Fuentes de Área	19,829	2,207	37	11,345	13,514	248,301	6,942,336	287,671	38
Fuentes Móviles	3,902	2,849	3,306	1,552,204	154,919	185,384	22,290,505	3,080	1,411
Fuentes Naturales	730	148	N/A	N/A	1,031	35,585	N/A	N/A	N/A
Total	29,447	6,063	6,718	1,570,510	189,558	598,448	44,038,605	291,102	1,502

*Las emisiones de N₂O por la construcción de vialidades no son significativas

En lo que se refiere a las PM₁₀, la categoría de la construcción vial, quedó en segundo lugar en emisiones, para las PM_{2.5}, dicha categoría quedó en la tercera posición y los COV en la veintitrés (Tabla 8.11 a Tabla 8.13).

Tabla 8.11 Contribución y posición de PM₁₀ de la construcción de vialidades del Escenario homogéneo

Sector	% contribución	Posición
Caminos sin pavimentar	38.91	1
Construcción de vialidades	17.49	2
Caminos pavimentados	9.15	3
Tractocamiones	4.94	4
Productos minerales no metálicos	4.80	5
Autos particulares	3.27	6
Productos alimenticios, bebidas y tabaco	2.95	7
Productos metálicos, maquinaria y equipo	2.80	8
Sustancias químicas, productos derivados del petróleo y del carbón, de hule y de plástico	2.66	9
Erosión eólica del suelo	2.48	10
Vehículos de carga mayores a 3 ton.	1.84	11
Textiles, prendas de vestir e industria del cuero	1.58	12
Autobuses	1.33	13
Combustión habitacional	0.87	14
	95 % de emisiones	

Tabla 8.12 Contribución y posición de PM_{2.5} de la construcción de vialidades del Escenario homogéneo

Sector	% contribución	Posición
Tractocamiones	20.09	1
Caminos sin pavimentar	18.77	2
Construcción de vialidades	9.30	3
Autos particulares	8.43	4
Vehículos de carga mayores a 3 ton.	7.31	5
Autobuses	5.57	6
Productos minerales no metálicos	4.65	7
Combustión habitacional	4.24	8
Generación de energía eléctrica	3.25	9
Erosión eólica del suelo	2.44	10
Incendios forestales	1.58	11
Taxis	1.58	12
Sustancias químicas, productos derivados del petróleo y del carbón, de hule y de plástico	1.50	13
Vehículos de carga de hasta 3 ton.	1.40	14
Papel y productos de papel, imprenta y editoriales	1.24	15
Productos alimenticios, bebidas y tabaco	1.19	16
Productos metálicos, maquinaria y equipo	1.17	17
Combustión comercial/institucional	0.96	18
	95 % de emisiones	

**Tabla 8.13 Contribución y posición de COV de la construcción de vialidades del
Escenario homogéneo**

Sector	% contribución	Posición
Autos particulares	15.15	1
Sustancias químicas, productos derivados del petróleo y del carbón, de hule y de plástico	10.72	2
Uso comercial y doméstico de solventes	10.43	3
Vegetación	5.95	4
HCNQ en la combustión de gas LP	5.79	5
Fugas en instalaciones de GLP	4.67	6
Motocicletas	4.38	7
Recubrimiento de superficies industriales	4.18	8
Recubrimiento de superficies arquitectónicas	3.91	9
Papel y productos de papel, imprenta y editoriales	3.85	10
Limpieza de superficie industrial	3.57	11
Productos metálicos, maquinaria y equipo	2.66	12
Taxis	2.40	13
Microbuses	2.35	14
Textiles, prendas de vestir e industria del cuero	1.98	15
Rellenos sanitarios	1.95	16
Pick up	1.59	17
Vehículos de carga mayores a 3 ton.	1.33	18
Artes gráficas	1.32	19
Lavado en seco	1.27	20
Vagonetas y Combis	1.27	21
Productos alimenticios, bebidas y tabaco	1.24	22
Construcción de vialidades	1.18	23
Autobuses	0.93	24
Panaderías	0.85	25
Vegetación	5.95	26
HCNQ en la combustión de gas LP	5.79	27
Fugas en instalaciones de GLP	4.67	28
	95 % de emisiones	

En definitiva, tomando de referencia cualquiera de los escenarios, se puede concluir que la actividad de la construcción es una categoría *clave* y que debe ser incluida en los inventarios de emisiones, toda vez que las PM₁₀ y PM_{2.5} de dicha categoría, siempre se encuentran dentro del 95% de las emisiones respectivas. Asimismo, hay que considerar que los escenarios antes expuestos ya consideran un 50% de reducción de emisiones de partículas por la aplicación de agua.

Ahora bien, el presente documento sólo evaluó la construcción de vialidades, por lo que si se tomaran en cuenta todas las construcciones, tanto de edificación como de vialidades, se advierte que esta actividad es mucho más contaminante y por lo tanto, es conveniente y recomendable que se incorpore en los Inventarios de Emisiones.

8.4 Incertidumbre

La incertidumbre es el intervalo o rango de los valores posibles de una medida, incluye tanto los errores sistemáticos como aleatorios (provenientes de varias fuentes). En los inventarios de emisiones, la estimación de la incertidumbre es un elemento esencial, sus resultados no están orientados a cuestionar la validez de las estimaciones realizadas, su función es ayudar a priorizar los esfuerzos por mejorar la exactitud de los inventarios futuros y orientar en las decisiones sobre la elección de la metodología (IPCC, 2000).

Cabe aclarar que no existen metodologías de incertidumbre establecidas, por lo que la U.S. EPA y el NARSTRO³⁵ recomiendan las *Guías* desarrolladas por el IPCC. De manera general, la estimación de la incertidumbre resulta afectada por la elección del algoritmo, el cual se basa en funciones estadísticas de porcentaje de error (ERG, 1997), o de la propagación de errores.

Idealmente, tanto las estimaciones de las emisiones como los márgenes de incertidumbre, se derivarían de muestreos específicos de cada fuente. Sin embargo, en la realidad no es práctico medir de esta forma todas las fuentes emisoras, por lo que las estimaciones suelen basarse en las características conocidas de fuentes típicas, consideradas representativas de la población (datos de actividad y factores de emisión). Esto introduce márgenes de incertidumbre, porque debe suponerse que la población se comporta, en término medio, como si hubiera sido medida.

En el presente documento, se realizó el cálculo de incertidumbre para las PM₁₀ y PM_{2.5}, pues son los únicos contaminantes que tienen un factor de emisión acreditado por instancias en materia ambiental, como lo es la US-EPA, el Midwest Research Institute y el Instituto Nacional de Ecología de México.

³⁵ NARSTRO: Asociación dedicada a la gestión de la calidad del aire en Norte América (México, Estados Unidos y Canadá).

Para el cálculo de la incertidumbre de las emisiones de partículas de la construcción de vialidades, se utilizaron dos estimaciones de emisiones:

- Emisiones certificadas: estimadas con el factor de emisión de la construcción de caminos del Midwest Research Institute, el cual está aprobado por la US-EPA y corresponde a 1.04 ton/ha/mes (MRI, 1996). Con este factor, dichas emisiones ascienden a 5,147 toneladas de PM₁₀ y 515 toneladas de PM_{2.5}.
- Emisiones del escenario combinado y del máximo:

Escenario	PM₁₀	PM_{2.5}
Combinado	835	95
Homogéneo	5,151	564

Las incertidumbres obtenidas como porcentaje de error, son las siguientes:

Incertidumbre	PM₁₀	PM_{2.5}
Combinado	84%	82%
Homogéneo	0.1%	9.6%

Con los valores expuestos, se observó que el *escenario homogéneo*, resultado de la aplicación de los factores de emisión de la vialidad *Los Remedios-Ecatepec*, es el escenario que obtuvo una menor incertidumbre, comparando dichas emisiones y las estimadas con el factor de emisión del MRI. Es decir, este escenario sería el más factible de ser incluido en los Inventarios de Emisiones, ya que su baja incertidumbre, nos da la certeza de que los cálculos obtenidos son de buena calidad.

Sin embargo, se considera que el cálculo de emisiones con ambos factores de emisión, es una manera general de estimación, pues se asume que todas las obras son del mismo tipo y características.

Finalmente, hay que recordar que la incertidumbre no pretende validar las estimaciones, sino establecer y determinar, en dónde se requiere orientar los esfuerzos, para tener una mayor precisión de las emisiones.

Conclusiones

Si bien la construcción es considerada como una de las principales actividades generadoras de empleos, también es importante consumidora de recursos naturales. Por lo tanto, además de ser sector económico y social trascendental, es una fuente generadora de contaminantes, especialmente de partículas y compuestos orgánicos volátiles.

Las emisiones de la construcción son directamente proporcionales a la superficie trabajada y a la velocidad de los vehículos dentro de la obra; al mismo tiempo, son inversamente proporcionales al contenido de humedad del suelo. Además, se menciona que con la aplicación de riego durante las fases de construcción, las emisiones de partículas se pueden disminuir hasta en un 50%.

Los Inventarios de Emisiones son parte de las herramientas básicas para la evaluación de la contaminación del aire y además, han sido la plataforma para el desarrollo de los planes y programas de mejoramiento de la calidad del aire, implementados en los últimos años en la ZMVM.

Aún cuando los inventarios de emisiones de la ZMVM consideran 52 categorías de estimación, existen actividades que aún podrían ser incluidas, entre éstas se pueden mencionar a la actividad de la construcción, la operación de maquinaria y equipo de construcción, entre otras.

Para dar certidumbre a las estimaciones realizadas y por no tener punto de comparación, se establecieron tres escenarios: *inicial*, *combinado* y *homogéneo*. En los tres escenarios planteados, las partículas de la construcción de vialidades se encuentran dentro del 95% de las emisiones, lo cual sugiere, que dicha categoría es *clave* y debe ser considerada en los Inventarios de Emisiones, ya que estos contaminantes representan un problema para la calidad del aire y la salud de la población de la ZMVM.

La ZMVM presenta problemas por la generación de ozono, el cual tiene como precursores a los compuestos orgánicos volátiles y a los óxidos de nitrógeno. En el escenario *homogéneo*, los COV de la construcción de vialidades quedan incluidos en el 95% de las emisiones totales de COV. Se considera que una estimación más precisa de esta categoría, sería de gran importancia para la aplicación de medidas de reducción de COV, coadyuvando al mismo tiempo, a disminuir los problemas por contaminación de ozono en la ZMVM.

La estimación de emisiones sólo toma en cuenta la construcción de vialidades; por lo tanto, si se incorporan otros tipos de obras (habitacional, industrial, entre otras), dicha actividad resultaría ser aún más contaminante. No obstante que no se evaluaron las emisiones de otros tipos de obras, se incluye la metodología por actividad de la construcción, la cual puede ser utilizada para el cálculo de obras distintas a las viales.

Tomando en consideración los problemas ambientales de la ZMVM en lo que se refiere a partículas, la actividad de la construcción es una categoría que debe ser incluida en los Inventarios de Emisiones, en caso contrario, las emisiones en los Inventarios se consideran subestimadas.

Se conjuntó una serie de metodologías de estimación de emisiones, que pueden ser aplicadas por etapa y/o tipo de construcción. Además de particularizar en el cálculo de emisiones de la actividad de la construcción de vialidades. Dichas metodologías pueden ser adoptadas por las autoridades en materia ambiental a cualquier nivel de gobierno.

Recomendaciones

Si bien la actividad de la construcción es una categoría que debe ser evaluada en los Inventarios de Emisiones, para tener una mejor estimación de los contaminantes atmosféricos, las autoridades ambientales deberán de requerir de los promoventes, una serie de medidas de mitigación, para que a su vez, sean tomadas en consideración al evaluar las emisiones de dicha actividad, especialmente en lo que se refiere a la generación de material particulado.

Asimismo, es necesario que las autoridades ambientales correspondientes, provean de un formulario, que comprometa al promovente de la construcción, a proporcionar un mínimo de información de la obra, para poder llevar a cabo una correcta evaluación de las emisiones contaminantes.

Las medidas de mitigación de emisiones que pueden realizarse en los sitios de construcción, pueden quedar incluidas en las siguiente relación:

- Aplicación de agua,
- Estabilizadores químicos (para retención de agua, disminuir la evaporación, aglutinación de materiales, por mencionar algunos),
- Barreras o vallas para el control de polvo y ruido,
- Control de velocidad y viajes de vehículos y maquinaria dentro del sitio,
- Calendarizar actividades de mayor emisión durante meses de baja velocidad de viento (ej. demolición),
- Establecer sistemas de lavado de ruedas de vehículos y maquinaria, en puntos de incorporación a las vías de comunicación, así como la protección de la carga de vehículos con lonas,
- Aplicación de capas de grava para control de polvo sobre áreas no pavimentadas,
- Reciclaje de materiales,
- Utilización de pintura a base agua,
- Aprovechar la luz natural,
- Planificación de cierres o impedimentos a la circulación,

- Mantenimiento constante de vehículos, maquinaria y equipo,
- Cumplimiento de la reglamentación ambiental en vigor.

Las medidas anteriores son sugeridas más no limitativas y, en particular, la aplicación de agua es lo más usual y eficaz, ya que con esto, se pueden atenuar hasta un 50% las emisiones de partículas.

Cabe mencionar, que aún cuando las Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIA) deberían ser la fuente de información para la evaluación de las emisiones de la construcción, se observó que en la mayoría de las obras los datos reportados están subestimados, o no reportan la información mínima para realizar la estimación de emisiones.

Además de lo anterior, los sitios de construcción deben ser inspeccionados y/o monitoreados por las instancias en la materia, en particular las obras de gran duración, para observar los cumplimientos ambientales mínimos reportados en sus MIA.

Bibliografía

Alavedra, P., Domínguez, J., Gonzalo, E. y Serra, J., 1998. La construcción sostenible. El estado de la cuestión. Instituto Juan de Herrera. Av. Juan de Herrera 4. 28040 Madrid. España. ISSN: 1578-097X. Ciudades para un Futuro más Sostenible.

Alcalá, U. J. M. A., 2007. Incorporación de la variable ambiental sustentable a la construcción de vialidades primarias. Estudio de un caso metropolitano: Distribuidor vial Zaragoza-Texcoco. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F. 95 p.

CAM, 2002. Programa de Mejoramiento de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010. Comisión Ambiental Metropolitana (SMA-GDF, Secretaría de Ecología-Estado de México, SEMARNAT, SSA).

CARB, 2007. User's Guide for OFFROAD2007. California Air Resources Board. Mobile Source Emissions Inventory Program. Consultado en marzo, 2009 de: <http://www.arb.ca.gov/msei/msei.htm>.

CARB, 2008. EMFAC2007. California Environmental Protection Agency, California Air Resources Board. Consultado en septiembre 2009 de: http://www.arb.ca.gov/msei/onroad/latest_version.htm.

Chow, J.C.; Watson, J. G.; Edgerton, S. A.; Vega, E.; 2002. Chemical composition of PM_{2.5} and PM₁₀ in Mexico City during winter 1997. *The Science of the Total Environment* 287 (2002) 177-201.

Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal, 2008. Informe especial sobre el derecho humano a un ambiente sano y la calidad del aire en la Ciudad de México. México, D.F., 135 p.

Comisión de Recursos Naturales del la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2008. Información en línea CORENA. Consultado en diciembre 2008 de: <http://www.sma.df.gob.mx/corena/>.

Diario Oficial de la Federación, 1988. Ley General del Equilibrio Ecológico y de Protección al Ambiente (actualización 2005).

Edgerton, S.A.; Arriaga, J. A.; Bian, X.; Bossert, J.E.; Chow, J.C.; Coulter, R.L.; Doran, J.C.; P.V. Dpskey, S.; Elliot, J.D.; Fast, J.S.; Gaffney, F.; Guzmán, J.M.; Hubbe, J.T.; Lee, E.L.; Malone, N.A.; McNair, W.; NET, E.; Ortiz, R.; Petty, M.; Ruiz, W.J.; Shaw, G.; Sosa, E.; Vega, J.G.; Watson, C.D.; Whiteman, S.; Zhong ; 1998. Particulate Air Pollution in Mexico City. A Collaborative Research Project: U.S. Department of Energy (DOE)-PEMEX.

EMISSIONS, s. f. *Greenhouse Gas Strategy Software*. Torrie Smith Associates Inc. Ontario Canada. Consultado en enero 2010 de: <http://torriesmith.com/index.html>

ERG, 1997. Volumen VI Programa de Mejoramiento de los Inventarios de Emisiones. Capítulos I al V . Preparado por Eastern Research Group, Inc., para: Quality Assurance Committee Emission Inventory Improvement Program. USA. Consultado en Diciembre de 2008 de: <http://www.epa.gov/ttnchie1/eiip/techreport/volume06/vi04.pdf>

Gaceta Oficial del Distrito Federal, 29 de noviembre 2006. NADF-009-AIRE. Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006. Que establece los Requisitos para elaborar el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire.

GDF, INEGI y GEM, 2007. Encuesta 2007 Origen-Destino. México, D.F. 135 p.

GEM, 2009. Gobierno del Estado de México. Consultado en marzo 2009 de:

<http://portal2.edomex.gob.mx/edomex/inicio/index.htm>
<http://www.gem.gob.mx/compromisos/cg/t4fict.asp?nc=33>
<http://www.gem.gob.mx/compromisos/cg/t4fict.asp?nc=94>
<http://www.gem.gob.mx/compromisos/cg/t4fict.asp?nc=122>
<http://www.gem.gob.mx/compromisos/cg/t4fict.asp?nc=272>
<http://edomex.gob.mx/portal/page/portal/secom/autopistas/>
<http://edomex.gob.mx/portal/page/portal/secom/transporte/tarticcdazt>
<http://edomex.gob.mx/portal/page/portal/secom/vialidades/xochiaca>
<http://habitat.aq.upm.es/boletin/n4/apala.html> (marzo, 2009)
<http://www.educaweb.com/esp/servicios/report/iem/> (enero, 2008).
<http://www.sustentable.cl/portada/Energia/4891.asp> (octubre, 2008)

IEM, 2008. Contaminación Atmosférica. Instituto de Estudios Medioambientales (IEM). Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Consultado en febrero 2009 de:
<http://www.educaweb.com/esp/servicios/report/iem/>

INE-SEMARNAT, 2006. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002. Coordinación del Programa del Cambio Climático. México, Distrito Federal. 70 p.

INEGI, 2002. Marco Geoestadístico Municipal 2000. <http://www.inegi.gob.mx>

INEGI, 2005. Estadísticas del Medio Ambiente y Zona Metropolitana del Valle de México 2002.

INEGI, 2007. Síntesis de Resultados. II Censo de Población y Vivienda 2005. Consultado en junio 2009 de: <http://www.inegi.gob.mx>.

INE-SEMARNAT, 2004. Opciones para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte. Consultado en agosto 2009 de: <http://www.ine.gob.mx>.

INE-SEMARNAT, 2008. Consultado en junio 2008 de:
<http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/437/dick2.html>.

Instituto de Ingeniería-UNAM, 2006. Estudio integral metropolitano de transporte de carga y medio ambiente para el Valle de México (EIMTCA - MAVM). Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales.

IPCC, 2000. Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (vol. 1-5). Consultado en julio 2009 de: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>

IPCC, 2001a. Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. Consultado en julio 2009 de: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/pdf

IPCC, 2001b. Cambio Climático 2001: Informe de síntesis. Glosario de términos utilizados en el Tercer Informe de Evaluación del IPCC. Consultado en marzo 2009 de: <http://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Working Group contributions to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Consultado en enero 2008 de: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf.

López L., V.M., 2009. Cambio climático y calentamiento global. Ed. Trillas, México, D.F., 227 p.

Metrobús, 2009. Información estadística del Metrobús. Consultado en octubre 2009 de: <http://www.metrobus.df.gob.mx>.

Metrobús, 2010. Línea 3 del Metrobús.. Eje 1 Poniente. Consultado en marzo 2010 de: <http://www.metrobus.df.gob.mx>.

Metrópoli, 2007. Los 25 proyectos estratégicos” del Gobierno del DF. Año 2. Núm. 20. Consultado en septiembre 2009 de: http://www.ciudadanosenred.com.mx/previo/me_300408/M2025-20.pdf.

MRI, 1996. Improvement of Specific Emission Factors (BACM Project No.1). Final Report. Prepared for South Coast Air Quality Management District by Midwest Research Institute. Kansas City, Missouri.

MRI, 2006. Background Document for Revisions to Fine Fraction Ratios Used for AP-42 Fugitive Dust Emission Factors. By Chatten Cowherd, MRI Project Leader, For Western Governors' Association. Midwest Research Institute. Kansas City, Missouri. MRI Project No. 110397.

Miliarium, 2009. Ingeniería Civil y Medio Ambiente. Consultado en septiembre 2008 de: <http://www.miliarium.com/Proyectos/PlantaCompostaje/Anejos/FaseConstruccion.asp>

MIT, 2004. Proyecto para el Diseño de una Estrategia Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de México 2001-2010. Segunda Fase. Massachusetts Institute of Technology (MIT). Cambridge, MA, U.S.A.

Molina, M.J., Molina, L.T., 2000. Estrategia Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de México. Massachusetts Institute of Technology (MIT). Cambridge, MA, U.S.A.

Molina, L.T. y Molina, M.J., 2002. Air Quality in the México Megacity. An Integrated Assessment. Kluwer Academic Publishers. 375 p. Norwell, MA 02061, U.S.A.

National Institute of Standards and Technology, 2007. Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES)-Technical Manual and User Guide. Building and Fire Research Laboratory. Gaithersburg, MD 20899-8603. 307 p.

Navar, J. y Treviño, E., 1997. Estimación del tonelaje de partículas de suelo que potencialmente contribuyen a la contaminación del aire en el área metropolitana de Monterrey (p. 21-31). Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, N.L., México

ONU/EIRD, 2008. El cambio climático y la reducción del riesgo de desastres. Nota Informativa No. 1. 14 p. Consultado en mayo 2010 de: <http://www.eird.org/publicaciones/RRD-Cambio-Climatico.pdf>

OPS, 2005. Evaluación de los efectos de la contaminación del aire en la salud de América latina y el Caribe. Organización Panamericana de la Salud, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. Washington, D. C., 70 p.

Radian International, 1997. Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Asociación de Gobernadores del Oeste y Comité Asesor Binacional. 0389. Old Placerville Road Sacramento, CA 95827.

- Volumen II-Fundamentos de Inventarios de Emisiones.
- Volumen VI Desarrollo de Inventario de Emisiones de Vehículos Automotores.
- Volumen V-Desarrollo de Inventario de Emisiones de Fuentes de Área Final.

RETC, 1996. Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (National Executive Proposal).

Rivas, T. L. A., 2006. Como hacer una tesis de maestría.. Editorial "Taller Abierto S.C.L." 2ª edición. México. 37 p.

Roodman, D. M., y Lenssen, N. A., 1995. A building revolution: How Ecology and Health Concerns are Transforming Construction. Worldwatch Institute Paper 124. 67 p.

RTP, 2009. Información estadística de RTP. Consultado en octubre 2009 de: <http://www.rtp.gob.mx/>.

Sacramento Metropolitan Air Quality Management District, 2010. Road Construction Emissions Model Version 6.3.2. SMAQMD, California Department of Transportation, the California Air Resources Board, the U.S. EPA, Jones & Stokes and Rimpo and Associates, Inc.

Sarmiento, R. J., 2006. Inventario de partículas PM₁₀ y PM_{2.5} de la Zona Metropolitana del Valle de México. SMA-Gobierno del Distrito Federal. Dirección de Inventario de Emisiones y Fuentes Estacionarias. Taller sobre Partículas Suspendidas en la Zona Metropolitana del Valle de México.

Sbarato, R. D., 2000. Metodologías para diagnóstico y pronóstico de contaminación atmosférica en ecosistemas urbanos. Editorial Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. 274 p.

SCT, 2007. Foro Global de Desarrollo Sustentable - OCDE. Los cambios en el transporte relacionados con la globalización en México. Guadalajara, Jal. Noviembre, 2007.

SETRAVI, 2006. Programa Integral de Transporte y Vialidad del Distrito Federal 2001-2006

SETRAVI, 2008. Movilidad Sustentable. Eje 4 Sur. Consultado en enero 2009 de: <http://www.setravi.gob.mx>.

SEMARNAT, 1998. NOM-123-ECOL-1998. Que establece el contenido máximo permisible de compuestos orgánicos volátiles (COVS), en la fabricación de pinturas de secado al aire base disolvente para uso doméstico y los procedimientos para la determinación del contenido de los mismos en pinturas y recubrimientos.

SEMARNAT-INE, 2009. Cuarta comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México D.F. Consultado en enero 2010 de: http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=615

SEMARNAT-INE-WGA, 2005. Guía de elaboración y uso de los inventarios de emisiones. México, D.F. 506 p.

Shirley, T. R.; Brune, W. H.; Ren, X.; Mao, J.; Leshner, R.; Cardenas, B.; Volkamer, R.; Molina, L. T.; Molina, M. J.; Lamb, B.; Velasco, E.; Jobson, T.; Alexander, M., 2006. Atmospheric oxidation in the Mexico City Metropolitan Area (MCMA) during April 2003. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 6:2753-2765

SIEM, 2007. Sistema Empresarial Mexicano. Consultado en noviembre 2009 de: <http://www.siem.gob.mx/portalsiem/>

SMA-GDF, 2010a. Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio, Zona Metropolitana del Valle de México, 2008. Consultado en julio de 2010 de: http://www.sma.df.gob.mx/simat2/inventario_emisiones/

SMA-GDF, 2010b. Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2008. Consultado en julio de 2010 de: http://www.sma.df.gob.mx/simat2/inventario_emisiones/

SMA-GDF, 2009. Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe 2008. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. D.F., México. Consultado en febrero de 2010 de: <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informe2008/>

SMA-DGF, 2008a. Seis medidas metropolitanas de la calidad del aire. Estimación de la reducción de emisiones. México, D. F. 59 p.

SMA-DGF, 2008b. Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2006. México, D. F. 154 p.

SMA-GDF, 2008c. Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2008-2012. 171 p.

SMA-GDF, 2008d. Informe de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México: Estado y Tendencias 1990-2007. SIMAT. Primera Edición, Ciudad de México. 50 p.

SMA-DGF, 2008e. Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de la Zona Metropolitana del Valle de México 2006. México, D. F. 154 p.

SMA-GDF, 2007. La Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México: Estado y Tendencias 1986-2006. Informe del estado y tendencias de la contaminación atmosférica. Ciudad de México. 34 p.

SMA-DGF, 2007b. Plan Verde de la Ciudad de México, 2007. Consultado en enero 2008: <http://www.sma.df.gob.mx/planverde/>

SMA-DGF, 2007c. Agenda Ambiental de la Ciudad de México. Programa de Medio Ambiente 2007-2012. Primera Edición, México. 180 p.

SMA-GDF, 2006a. Estrategia Local de Acción Climática del Distrito Federal (ELAC). México, D.F., 214 p.

SMA-GDF, 2006b. La calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México. 20 años de monitoreo atmosférico. México, D.F. 86 p.

SMA-GDF, 2006c. Gestión Ambiental del Aire en el Distrito Federal. Avances y propuestas 2000-2006. Primera edición, México, D.F. 262 p.

SMA-GDF, 2004a. Hacia la Agenda XXI de la Ciudad de México. México, Distrito Federal. 146 p.

SMA-GDF, 2004b. Informe del Estado de la Calidad el Aire y Tendencias 2004. ZMVM. 41 p.

SO-GDF, 2009. Secretaría de Obras del Distrito Federal.
<http://www.obras.df.gob.mx/index.html> (marzo, 2009)

STE, 2009. Información estadística del Sistema de Transportes Eléctricos del DF. Consultado en octubre 2009 de: <http://www.ste.df.gob.mx/>.

UNFCCC, 1992. Artículo 1 de la UNFCCC. Definiciones. Consultado en enero 2010 de:
http://unfccc.int/essential_background/convention/background/items/1349.php.

UNITAR, 2008. Consultado en septiembre 2008 de:
http://www.unitar.org/cwm/publications/cbl/prtr/cat2_list.html# México.

URBEMIS, 2007. Urban Land Use Emissions Model. Software User's Guide for Windows Version 9.2. Emissions Estimation for Land Use Development Projects. Prepared for: Air Quality Management District. Prepared by: Jones & Stokes Associates. Sacramento, CA 95818.

US-EPA, 2009. AP 42. Fifth Edition. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources. Consultado en marzo 2009 de:
<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/>.

- Miscellaneous Sources. 13.2.2 Unpaved Roads.
- Miscellaneous Sources. 13.2.3 Heavy Construction Operations.
- Miscellaneous Sources. 13.2.4 Aggregate Handling And Storage Piles.
- Miscellaneous Sources. 13.2.5 Industrial Wind Erosion.
- Miscellaneous Sources. 13.2.1. Paved Roads.
- Miscellaneous Sources. 13.2.2. Unpaved Roads.

Velasco, E., Márquez C., Bueno, E., Bernabé, R. M., Sánchez, A., Fentanes, O., Wöhrnschimmel, H., Cáardenas, B., Kamilla, A., Wakamatsu, S. y Molina, L. T., 2007. Vertical distribution of ozone and VOCs in the low boundary layer of Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 7, 12751–12779, 2007.

www.atmos-chem-phys-discuss.net/7/12751/2007/

VIABILIS, 2006. Manifestación de impacto ambiental para la construcción y operación de una vialidad de altas especificaciones, posterior al embovedado del Río los Remedios, entre el Vaso Regulador del Cristo, en el Municipio de Naucalpan de Juárez, y el Dren Nacional en el Municipio de Nezahualcóyotl, Estado de México. 266 p.

VIABILIS, 2010. Información de insumos de la construcción y maquinaria, durante el primer tramo de la construcción de la vialidad Los Remedios-Ecatepec. [información digital].