

1996

INVENTARIO de EMISIONES
a la ATMÓSFERA en la
ZMVM

COMISIÓN AMBIENTAL METROPOLITANA

INVENTARIO DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE MÉXICO 1996

AGOSTO 1999

DIRECTORIO

Cuauhtémoc Cárdenas Solórzano
Jefe de Gobierno del Distrito Federal

César Camacho Quiroz
Gobernador del Estado de México

Julia Carabias Lillo
Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca

Alejandro Encinas Rodríguez
Secretario del Medio Ambiente del Distrito Federal

Martha Garcíarivas Palmeros
Secretaria de Ecología del Estado de México

Enrique Provencio
Presidente del Instituto Nacional de Ecología

Enrique Rico Arzate
Director General de Prevención y Control de la Contaminación

Diana Ponce Nava
Directora General de Proyectos Ambientales

Julio Castellón Guillermo
Director General de Planeación Ambiental

Adrián Fernández Bremauntz
Director General de Gestión e Información Ambiental

Coordinadores:

Mónica Viétnica Alegre González
Hugo Landa Fonseca
Jorge Lara Osorio

Rocío Reyes Martínez
Jesús Contreras Franco
Jorge Sarmiento Rentería

Participantes

Fuentes puntuales:

¹ Jesús Contreras Franco
² Violeta Jaqueline Cedillo Martínez
¹ Jorge Sarmiento Rentería
¹ Alma Delia Muñoz Capetillo
¹ Roberto Martínez Verde
¹ Mariano Montes González

Fuentes de área:

² Hugo Landa Fonseca
² Graciela Hernández Ruíz
² Guillermina Barrera Zaragoza
² César Fausto Gálvez Hernández
² Jorge Lara Osorio
³ Andrés Aguilar Gómez
³ Rocío Reyes Martínez

Fuentes vehiculares:

² Dionisio Moreno Rivero
² Arturo Choperena Villagómez
¹ Jorge Sarmiento Rentería
¹ Cristina Ruíz Ramírez
¹ Saúl Rodríguez Rivera

Fuentes naturales

Emisiones biogénicas:

² Mónica Viétnica Alegre González
² Rosa María Bernabé Cabanillas

Emisiones erosivas:

¹ Jorge Sarmiento Rentería
¹ Cristina Ruiz Ramírez

Otros participantes:

Xóchitl Cruz Nuñez
⁴ Sergio Romero Vallejo
⁴ Magnolia Oria Coria
³ Geóg. Cleotilde Arellano Molina
⁵ Dr. Luis Ontiveros

⁶ Ing. José Luis Sánchez Maldonado
⁷ Ing. Jesús Calvillo Zermeño
⁸ Elba Ortiz Romero Vargas
⁸ Jorge Gazca Ramírez

¹ Instituto Nacional de Ecología.

² Gobierno del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente.

³ Gobierno del Estado de México. Secretaría de Ecología.

⁴ Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo.

⁵ Pemex Gas y petroquímica Básica.

⁶ Secretaría de Energía.

⁷ Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

⁸ Instituto Mexicano del Petróleo.

ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Inventario de emisiones de fuentes puntuales	
Generalidades	8
Metodología	10
Resultados	16
3. Inventario de emisiones de fuentes de área	
Generalidades	24
Metodología	26
Resultados	32
4. Inventario de emisiones de fuentes vehiculares	
Generalidades	42
Metodología	45
Resultados	50
5. Inventario de emisiones de fuentes naturales	
5.1 Emisiones biogénicas	
Generalidades	52
Metodología	53
	55
5.2 Emisiones erosivas	
Generalidades	58
Metodología y resultados	58
6. Conclusiones y recomendaciones	61
Anexo I	
Estimación de emisiones de la fabricación de tabique rojo y bancos de materiales pétreos	65
Anexo II	
Evaluación de partículas de origen erosivo realizado por el Instituto Politécnico Nacional	67

1. Introducción

Las actividades que continuamente se realizan en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), inherentes a su crecimiento urbano y demográfico, han propiciado incremento en el establecimiento de industrias, comercios y servicios, y en el número de vehículos. Los costos, en términos de la degradación de la calidad del aire, se han convertido en una realidad que tenemos que pagar los que vivimos inmersos en esta región y que, al mismo tiempo, somos usuarios de esta cuenca atmosférica.

En este contexto, un indicador de la calidad del aire lo constituye el consumo de energéticos empleados en los sectores productivos y el transporte y también en el sector doméstico, ya que en su mayor parte los contaminantes emitidos a la atmósfera son el resultado de la combustión de diferentes tipos de combustibles fósiles¹. El balance del consumo de combustibles proporciona información, no solamente de la actividad económica de la zona, si no también sobre la forma en que se modifica la calidad del aire. En 1994, en la ZMVM se consumieron aproximadamente 170 mil barriles diarios de combustibles²; para 1996 el consumo aumentó a 186 mil barriles diarios, lo que representa un incremento del 9% en dos años³.

Por lo anterior, la identificación de las fuentes que emiten contaminantes a la atmósfera se vuelve una actividad importante y a la vez compleja, que demanda la instrumentación y aplicación de métodos bien definidos que permitan estimar el tipo y la cantidad de contaminantes que se incorporan a la atmósfera. Un instrumento importante en esta tarea lo constituye el inventario de emisiones a la atmósfera, mediante el cual es posible identificar tanto a las fuentes emisoras, como el tipo y cantidad de contaminantes generados como resultado de la realización de procesos industriales, actividades específicas y la circulación de vehículos.

De esta forma se sabe que en la ZMVM, la mayor parte de las emisiones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos se generan por el consumo de gasolina y diesel en el sector transporte, mientras que las emisiones de dióxido de azufre se generan por el consumo de combustibles industriales líquidos, generalmente utilizados en la industria y en los establecimientos de servicios. Las emisiones de las partículas menores a 10 micrómetros (PM10) son generadas por distintas fuentes, destacándose la circulación de vehículos en caminos no pavimentados, los suelos erosionados y el uso de ciertos combustibles como el diesel.

1 Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México (1996). Fundamentos y Evaluación de la Aplicación del Plan de Contingencias Ambientales.

2 DDF, Gob. Edo. México, Secretaría de Salud, Semarnap (1996). Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995–2000, Proaire.

3 Información de Pemex Gas y Petroquímica Básica. Ventas 1996.

Por otro lado, una fuente importante de emisiones a la atmósfera son las áreas con vegetación que rodean a la ciudad y aquellas que se encuentran en los parques y jardines. Estas fuentes naturales emiten compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno.

La experiencia que se ha tenido en México y en otros países, con relación a la integración y manejo de inventarios de emisiones confiables, ha permitido ubicar a este instrumento como una herramienta útil para:

- λ La toma de decisiones encaminadas a la aplicación de planes y programas de prevención y control de la contaminación del aire;
- λ La evaluación del cumplimiento de la normatividad ambiental establecida;
- λ El análisis de tecnologías disponibles;
- λ El seguimiento de la evolución del aumento o disminución en los volúmenes de emisión de contaminantes a la atmósfera.

A nivel nacional, de 1988 a 1992, el gobierno federal instrumentó un programa de capacitación ambiental relacionado con los inventarios de emisiones, el cual contempló varias ciudades del país. Posteriormente el programa se amplió de tal manera, que para 1994 se contaba con información preliminar de fuentes emisoras para 29 ciudades del país.

En 1989 se hizo un esfuerzo por elaborar un primer inventario de emisiones para la ZMVM, según el cual las fuentes industriales y de servicios participaban con sus emisiones en un 8.4% del total y los vehículos con un 77% (en particular, las emisiones de precursores de ozono se distribuyen de la siguiente manera: 24% de los óxidos de nitrógeno correspondió a fuentes industriales y servicios, y 75% a vehículos; 13% de los hidrocarburos a fuentes industriales y de servicios, y 53% a vehículos)⁴.

En 1994 se elaboró un segundo inventario de emisiones para la ZMVM, que cubrió las 16 demarcaciones del Distrito Federal y los 18 municipios conurbados del Estado de México, y se empleó en el *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995–2000 (ProAire)*. El segundo inventario no es completamente comparable con el primero, dado que en ambos se contó con información de diferente grado de detalle y desagregación y se aplicaron metodologías un tanto diferentes. En este segundo inventario se atribuyó el 75% de las emisiones totales al sector transporte, el 3% a la industria, el 10% a los servicios y el 12% a los suelos y la vegetación.

Para la actualización del segundo inventario se integró un grupo técnico interinstitucional, en el cual participaron: el Instituto Nacional de Ecología (INE), la Secretaría del Medio Ambiente del Departamento del Distrito Federal (ahora Gobierno del Distrito Federal), la Secretaría de Ecología del Estado de México, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, el Instituto Mexicano del Petróleo y el Instituto Politécnico Nacional.

⁴ ProAire. *Op cit.*

La integración del inventario de emisiones tiene como propósito contar con información que indique la situación actual, en cuanto al aporte de contaminantes a la atmósfera de los diferentes giros industriales, de los sectores doméstico, comercial y de servicios, así como de los vehículos automotores; además de considerar las emisiones naturales que se registran en el área (emisiones biogénicas y erosivas). De la misma manera con él, es posible evaluar las acciones y estrategias contempladas en los programas de reducción de emisiones como el ProAire.

Objetivo

Actualizar el inventario de emisiones a la atmósfera de la ZMVM elaborado en 1994, como herramienta de apoyo para la evaluación de las medidas y estrategias del Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995–2000.

Clasificación de las fuentes de emisión

Para el propósito de este inventario de emisiones 1996, las fuentes de emisión de contaminantes fueron han sido agrupadas de la manera siguiente:

- λ Fuentes puntuales: sector industrial;
- λ Fuentes móviles: sector transporte;
- λ Fuentes de área: sector doméstico, comercial y de servicio;
- λ Fuentes naturales: suelos y vegetación.

- A. *Fuentes móviles.* Es todo vehículo automotor que transita por vías de circulación como calles, carreteras, caminos y avenidas. Como ejemplo se pueden mencionar a los automóviles, camionetas pick up, vehículos de carga, autobuses y motocicletas⁵.
- B. *Fuentes de área.* Son todos aquellos establecimientos o lugares donde se desarrollan actividades que de manera individual emiten cantidades relativamente pequeñas de contaminantes, pero que en conjunto sus emisiones representan un aporte considerable de contaminantes a la atmósfera y que no llegan a considerarse como fuentes puntuales. En esta categoría se incluyen la mayoría de los establecimientos comerciales y de servicios y los hogares. Como ejemplos, se pueden mencionar a las panaderías, tintorerías, fabricación de tabiques, uso de combustibles y productos en el hogar, uso de pinturas y tintas, manejo de maquinaria de construcción, tractores, locomotoras, extracción de arena y grava y almacenamiento de combustibles, entre otros.⁶
- C. *Fuentes naturales.* Son fenómenos o procesos que se presentan de manera natural en los ecosistemas y cuyas emisiones son el resultado de la acción de eventos meteorológicos, geológicos y/o procesos metabólicos. En este tipo de fuentes se encuentran los suelos erosionados, las emisiones volcánicas, las emisiones generadas por los incendios forestales, por la cría de ganado y por procesos metabólicos de la vegetación.

Estimación de las emisiones

⁵ SEMARNAP y RADIAN (1997). Mexico Emissions Inventory Program Manuals. Vol. VI. Mobile Source Inventory Development.

⁶ SEMARNAP y RADIAN (1997). Mexico Emissions Inventory Program Manuals. Vol. V. Area Source Inventory Development.

De manera general, la estimación de las emisiones contaminantes son resultado del producto algebraico de un *factor de emisión* por su *dato de actividad* correspondiente.

Factor de emisión. Un factor de emisión es una razón que relaciona la cantidad de contaminante liberado a la atmósfera por unidad de actividad. Como ejemplos de factores de emisión se citan los siguientes:

- λ En la industria se puede tener kilogramos de contaminantes emitidos por cantidad de producto fabricado, kilogramos de contaminantes por unidad de tiempo, kilogramos de contaminantes por número de obreros, kilogramos de contaminantes por cantidad de combustible utilizado.
- λ En las fuentes de área se presentan kilogramos de contaminantes por cantidad de materia prima utilizada, kilogramos de contaminantes por habitante, kilogramos de contaminante por unidad de tiempo, kilogramos de contaminante por cantidad de combustible utilizado.
- λ Para las fuentes móviles se tienen gramos de contaminante por kilómetro recorrido, gramos de contaminante por pasajero o carga transportada, kilogramos de contaminantes por cantidad de combustible quemado.
- λ Para las fuentes naturales, se pueden mencionar kilogramos de contaminantes por hectárea sembrada o de bosque, kilogramos de contaminantes por cantidad de animales en una región.

El documento AP-42⁷ de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (EPA) es una recopilación de factores de emisión de contaminantes al aire.

Dato de actividad. Es una medida de una acción o actividad realizada, expresada como producción, uso de un material, número de obreros, cantidad de combustible quemado, gasolina vendida, por ejemplo.

Delimitación Geográfica y Población

Un elemento importante en la planeación de un inventario de emisiones, es definir los límites geográficos del área que éste cubrirá. Esta área por lo general se define con base en los problemas de contaminación atmosférica que se presentan en una región⁸.

El inventario de emisiones de la ZMVM integra a las 16 demarcaciones del Distrito Federal y a 18 municipios conurbados del Estado de México.

La superficie ocupada por la ZMVM es de 4,681 km², en donde se concentran alrededor de 16 millones habitantes con una densidad poblacional de 3,500 hab/km², y se asientan 44,580 establecimientos industriales, comerciales y de

⁷ Environmental Protection Agency (1997). Compilation of Air Pollutant Emission Factors. AP-42.

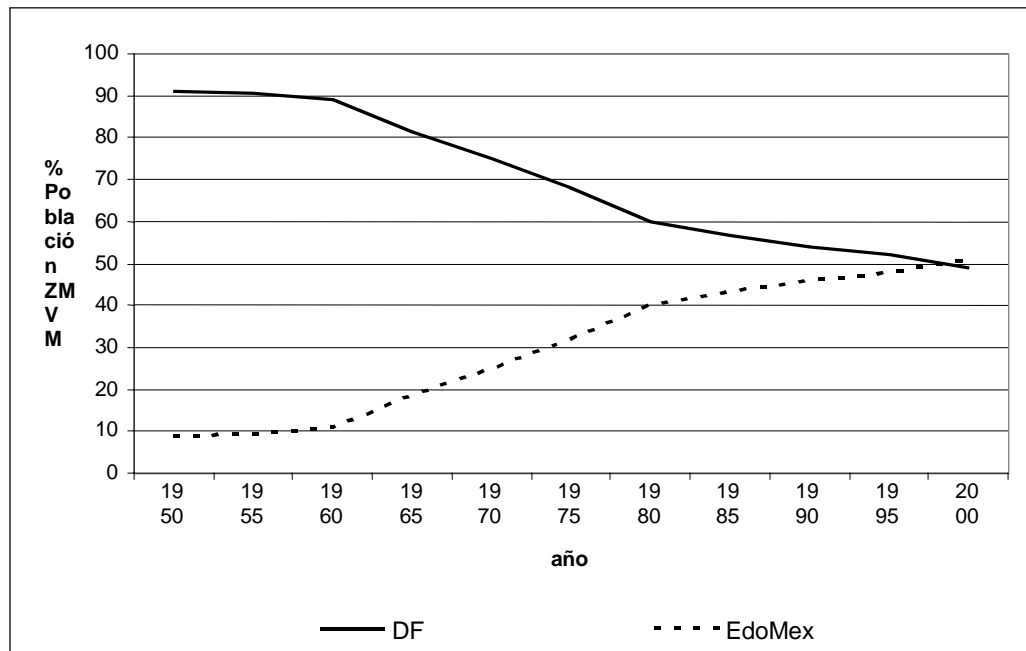
⁸ SEMARNAP y RADIAN (1997). Mexico Emissions Inventory Program Manuals. Vol. V. Area Source Inventory Development.

servicios⁹. Asimismo, se estima que el parque vehicular en circulación es cercano a los 3.2 millones de vehículos.

El desarrollo de la ZMVM ha generado una dinámica en su población, que rebasa las fronteras geográficas de las dos entidades que la integran. En 1995, el tamaño de la población residente en esta zona la colocó como la segunda región metropolitana más grande del mundo.

De 1940 a 1960, la ZMVM registró su mayor tasa de crecimiento poblacional (6% anual); sin embargo, a partir de 1960 ésta ha disminuido, de tal manera que para 1995 fue de 1.8% (menor a la tasa nacional que en ese mismo año fue de 2.06%). No obstante, continúa siendo la región más poblada de México, en donde tan sólo en el 0.3% del territorio nacional, se concentra el 18% del total de la población del país.

Gráfica 1.1. Composición de la población de la ZMVM, 1950-2000



De manera general, el crecimiento de la ZMVM, puede comprenderse mejor como el resultado de la interacción de cuatro factores importantes:

- λ El crecimiento natural de la población;
- λ La migración de poblaciones rurales a la ciudad;
- λ La concentración de las actividades políticas, económicas y culturales del país, en la ciudad capital;
- λ La movilidad espacial de la población dentro de la ZMVM.

En los últimos cinco años la tasa de crecimiento poblacional del Distrito Federal fue de 0.5 % promedio anual y la de los municipios conurbados de 3.3%. Actualmente el 49% de la población de la ZMVM vive en los municipios conurbados y el

⁹ INEGI-SEMARNAP (1997). Estadísticas del Medio Ambiente.

51% restante en el Distrito Federal (gráfica 1.1). Estos valores son el resultado de los movimientos migratorios, tanto de la población del Distrito Federal, como de otros estados, hacia los municipios conurbados del Estado de México.¹⁰

Consumo de combustibles

Debido a que los procesos de combustión en las fuentes puntuales, de área y móviles representan el principal aporte de contaminantes a la atmósfera de la ZMVM, sin duda alguna los cambios en la población y el consumo de combustibles son de relevancia para la actualización del inventario de emisiones.

Comparando el consumo de los diferentes combustibles distribuidos en 1994 y en 1996 en la ZMVM por sector, se puede observar en la tabla 1.1, que en el sector industrial disminuyó el consumo de diesel y se incrementó el de los combustibles gaseosos (gas natural y gas L.P.). Las termoeléctricas aumentaron su consumo de gas natural. En el sector transporte hubo una disminución en la utilización de la gasolina Nova, la cual fue sustituida por la gasolinas magna, premium y el gas L.P., lo que indica que el sector transporte se encuentra evolucionando hacia el uso de combustibles más limpios. Por último el sector residencial solo muestra un ligero aumento en el consumo de gas L.P.

Tabla 1.1. Consumo de combustibles por sector (millones de m³/año)

Combustible	Termoeléctricas		Industria		Transporte		Residencial	
	1994	1996	1994	1996	1994	1996	1994	1996
Gas natural	1.39	1.50	2.00	2.20	0.10	0.10	0.10	0.10
Gas L.P.			1.00	1.10	0.60	0.70	1.60	1.70
Gasolina nova					4.10	3.00		
Gasolina magna					2.60	3.10		
Gasolina premium						0.05		
Diesel de carburación					1.20	1.20		
Diesel especial			0.40	0.20				
Gasóleo			0.40	0.40				

En los capítulos siguientes se presenta las metodologías y resultados de cada una de las diferentes categorías de fuentes que conforman el inventario de emisiones de 1996, incorporando en gran medida las técnicas de estimación que el Instituto Nacional de Ecología señala en el Programa de Inventario de Emisiones para México.¹¹ Esto significa que con el inventario de 1996 se inicia el proceso de homogeneización de los métodos de estimación de las emisiones que se emplearán en adelante en la ZMVM.

¹⁰ Gobierno del Estado de México (1991). Perfil Sociodemográfico.

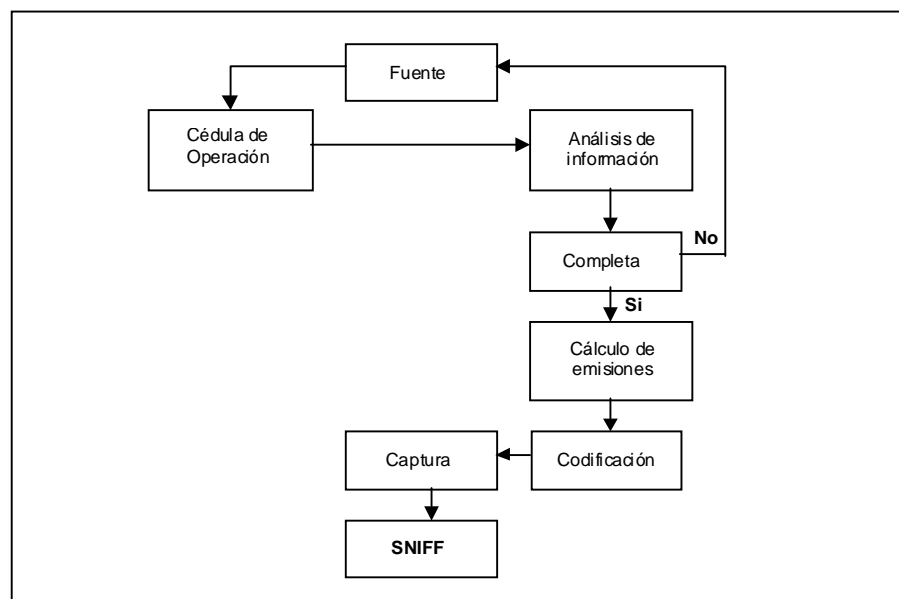
¹¹ Radian International, Semarnap (1995). Methods Evaluation and Proposal for Mexico Emissions Inventory Programa.

2. Inventario de Emisiones de Fuentes Puntuales

I. Generalidades

El inventario de emisiones del sector industrial de la Zona Metropolitana del Valle de México, se integró con información proporcionada al Instituto Nacional de Ecología, a través de la Cédula de Operación¹. La información se analizó y procesó para incorporarse al Sistema Nacional de Información de Fuentes Fijas (SNIFF). En la figura 2.1 se presenta el proceso de análisis e integración de la información.

Figura 2.1. Proceso de Análisis de la Información de Fuentes Fijas



Fuente: Instituto Nacional de Ecología

Recepción de Cédula de Operación. Esta se realiza en la Dirección General de Gestión e Información Ambiental del INE.

Análisis de la información. La información de la Cédula de Operación es analizada para su validación, codificación y captura en el SNIFF. En caso de que la información se encuentre incompleta o incorrecta, se solicita al establecimiento industrial su complementación.

Cálculos de emisiones. Se realizan empleando las técnicas de estimación de emisiones recomendadas por el Programa de Inventario de Emisiones para México² y con la información presentada en el formato de la Cédula de Operación sobre los

¹ La obligatoriedad de la presentación de la Cédula de Operación se sustenta en el Artículo 21 del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica.

² SEMARNAP y RADIAN (1996). Mexico Emissions Inventory Program Manuals. Vol. III - Basic Emissions Estimating Techniques. DCN96-670-017-01, RCN670-017-20-04.

procesos, equipos de control, consumo de materias primas y productos, consumo y tipo de combustibles y mediciones en chimenea.

Codificación. Para su incorporación en el SNIFF, los resultados de los cálculos de las emisiones son codificados y capturados de acuerdo a los catálogos utilizados por el INE³, que contienen las claves o códigos de las variables utilizadas como son: contaminantes, unidades de medida, medidas y equipos de control así como el tipo de estimación realizada, es decir, si la emisión es calculada u obtenida de mediciones efectuadas directamente en la fuente.

Para la actualización del presente inventario se consideraron tres metodologías, descritas en las técnicas de estimación de emisiones recomendadas para fuentes puntuales en el Manual de Inventario de Emisiones para México⁴:

1. *Muestreo en fuente.* Es una técnica en la que se realiza la medición de la concentración y flujo volumétrico de los contaminantes directamente en la fuente. Esta información es utilizada para calcular las emisiones en unidades de masa de los diferentes contaminantes y es comúnmente empleada en fuentes de combustión (calderas, hornos, turbinas, entre otros). Esta técnica es la más confiable, pero debido a la complejidad del muestreo y del equipo utilizado, hace que su empleo sea costoso. Cabe destacar que las técnicas de muestreo se aplican de acuerdo a la normatividad vigente y a la capacidad de los equipos;
2. *Factores de emisión.* Los factores de emisión, empleados en la estimación de emisiones para el sector industrial, se obtuvieron de mediciones y datos de procesos que se combinan con los datos de actividad recopilados en el formato de la Cédula de Operación y la Licencia de Funcionamiento (m³ de combustible, toneladas de materia prima, toneladas de producto, etc.). La fuente de información sobre factores de emisión más completa y confiable es el documento *Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42)* de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (USEPA);
3. *Balance de Material.* En esta técnica las emisiones estimadas se obtienen mediante la diferencia entre la cantidad de material que entra a un proceso y los productos y subproductos que se obtienen. Esta técnica se utiliza comúnmente cuando no se cuenta con datos provenientes de muestreos, con factores de emisión o cualquier otra técnica específica para el cálculo de las emisiones.

II. Metodología

En 1996, en la Zona Metropolitana del Valle de México se tuvieron registradas 5,255 industrias de jurisdicción federal situadas en las 16 demarcaciones del Distrito Federal y en los 18 municipios conurbados del Estado de México.

Para la actualización del presente inventario se procesó la información de 300 industrias de los 2,806 establecimientos que cumplieron con el trámite de Cédula de Operación. Los 300 establecimientos seleccionados incluyen a las empresas que generan emisiones totales mayores o iguales a 30 ton/año y que en conjunto representan más del 85% de las emisiones de este sector.

³ Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (1988). Programa Nacional de Capacitación Ambiental. Control de la Contaminación Atmosférica. 523 p.p.

⁴ SEMARNAP y RADIAN (1996). Mexico Emissions Inventory Program Manuals. Vol. IV - Point Source Inventory Development. DCN96-017-2105, RCN670-017-21-04.

Las técnicas de estimación empleadas por giro industrial para realizar el presente inventario, se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Técnicas de estimación de emisiones para fuentes fijas industriales

GIRO	CONTAMINANTE				
	Partículas	SO ₂	CO	NO _x	HC
Generación de energía eléctrica	FE	MF	MF	MF	FE
Petroquímica	FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE
Industria química	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE, BM
Mineral metálica	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE	FE
Mineral no metálica	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE	FE
Productos vegetales y animales	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE	FE
Madera y derivados	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE	FE
Industria del vestido	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE
Industria de consumo alimenticio	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE	FE
Productos de consumo varios	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE	FE
Productos de impresión	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE, BM
Productos metálicos	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE, BM
Productos de vida media	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE, BM
Productos de vida larga	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE, BM
Otros	MF, FE	MF, FE	MF, FE	MF, FE	FE

Nota: (FE) Factores de emisión, (MF) Muestreo en fuente, (BM) Balance de material.

Prácticamente en todos los establecimientos industriales se llevan a cabo procesos de combustión, que representan la fuente mayoritaria de emisiones a la atmósfera de este sector. Los factores que intervienen en la emisión por combustión dependen de:

- λ Tipo y tamaño de los equipos de combustión;
- λ Composición del combustible;
- λ Prácticas empleadas en la carga y el quemado;
- λ Nivel de instrumentación y mantenimiento de los equipos de combustión.

De acuerdo con el AP-42, los combustibles se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- λ *Destilados de petróleo.* Los combustibles destilados son más volátiles y menos viscosos que los residuales, tienen cantidades despreciables de nitrógeno y cenizas, y usualmente contienen menos del 0.3% en peso de azufre. Los destilados son utilizados como combustibles principalmente en el sector servicios. Ejemplos de estos combustibles son las gasolinas, el gas natural y el gas L.P.;
- λ *Residuales.* Los combustibles residuales son más viscosos y menos volátiles, son producto de los remanentes del fraccionamiento de productos más ligeros (gasolinas, kerosina y destilados) que han sido removidos del petróleo crudo, y por lo tanto tienen cantidades significativas de cenizas, nitrógeno y azufre. Se utilizan principalmente en la industria y en grandes establecimientos comerciales. Ejemplos: diesel, combustóleo, gasóleo.

Las emisiones de óxidos de azufre (SO_x) de la combustión son generadas por la oxidación del azufre contenido en el combustible. En promedio, más del 95% del azufre en el combustible es convertido en SO₂, entre el 1 y el 5% es posteriormente oxidado a SO₃, y alrededor del 1 al 3% es emitido como partículas sulfatadas. El SO₃ suele reaccionar con vapor de agua en la atmósfera y con los gases de combustión para formar ácido sulfúrico (lluvia ácida).

Los óxidos de nitrógeno (NOx) formados en los procesos de combustión se deben a:

- λ La fijación térmica del nitrógeno atmosférico en el aire de combustión, conocido como NOx térmico, y cuya formación depende de la temperatura máxima y/o la alta presión, la concentración de nitrógeno en el combustible, la concentración de oxígeno y el tiempo de exposición a las altas temperaturas;
- λ El nitrógeno contenido en el combustible, conocido como NOx de combustible.

El término NOx agrupa al óxido de nitrógeno (NO) y al bióxido de nitrógeno (NO₂). Datos de pruebas en sistemas de combustión externa de combustibles fósiles han mostrado que más del 95% de los NOx emitidos lo constituye el NO.

En el caso de los combustibles residuales, el factor más importante para la formación de NOx es el contenido de nitrógeno en el combustible; la conversión de nitrógeno a NOx se encuentra entre el 20 y el 90%, excepto en grandes equipos donde usualmente se alcanzan temperaturas muy elevadas en la flama, por lo que las emisiones de los óxidos de nitrógeno térmico pueden ser mayores.

Pequeñas cantidades de compuestos orgánicos totales (compuestos orgánicos volátiles, semivolátiles y orgánicos condensables) son emitidas durante la combustión. Al igual que en las emisiones de monóxido de carbono (CO), la emisión de los compuestos orgánicos depende de la eficiencia de combustión del equipo. Cuando la eficiencia de combustión es alta se reducen las emisiones de compuestos orgánicos totales y de monóxido de carbono.

La emisión de partículas provenientes de los procesos de combustión, en donde principalmente se utilicen combustibles líquidos, depende, entre otros factores, de la densidad y contenido de cenizas del combustible, de la eficiencia de combustión, de su contenido de azufre y de las condiciones de operación del equipo.

Factores de emisión para procesos de combustión.

a) Factores de emisión para combustión con gas natural

Para la estimación de las emisiones en los procesos de combustión con gas natural (y otros combustibles) del sector industrial, se utilizaron los factores de emisión del AP-42⁵ (tabla 2.2.). El gas natural esta compuesto por un mínimo de 80% de metano y su poder calorífico promedio en bruto es aproximadamente de 8,900 kcal/m³ en condiciones normales (900 a 1000 BTU/scf).

Tabla 2.2. Factores de emisión para combustión con gas natural

Contaminante	Generación de energía* (kg/10 ⁶ m ³)	Caldera industrial** (kg/10 ⁶ m ³)	Caldera comercial*** (kg/10 ⁶ m ³)
Partículas	16 - 80	219	192
Bióxido de azufre	9.6	9.6	9.6
Monóxido de carbono	640	560	330
Óxidos de nitrógeno	8,800	2,240	1,600
Compuestos orgánicos totales	28	92	128

Con base a la capacidad del equipo, estos factores se clasifican en las siguientes categorías:

⁵ Environmental Protection Agency (1995). Compilation of Air Pollutant Emission Factors. AP-42, Vol. I: Stationary Point and Area Sources. Fifth edition.

- * Su capacidad es mayor a 3,000 Caballos Caldera.
- ** Su capacidad se encuentra en el rango de 300 a 3,000 Caballos Caldera.
- *** Su capacidad se encuentra en el rango de 10 a 300 Caballos Caldera.

Los óxidos de nitrógeno son el principal contaminante proveniente del quemado de gas natural y sus niveles de emisión dependen de las condiciones de operación del equipo.

La emisión de partículas en el giro de generación de energía eléctrica se calculó utilizando un factor de $80 \text{ kg}/10^6 \text{ m}^3$ para el inventario de 1994; en el inventario de 1996 se empleó el factor de $200 \text{ kg}/10^6 \text{ m}^3$, debido a que para este caso se consideraron las partículas filtrables y condensables.

b) Factores de emisión para combustión de combustóleo, diesel y gasóleo

En la tabla 2.3 se presentan los factores de emisión del AP-42 para la combustión de combustóleo, diesel y gasóleo. El contenido de azufre (porcentaje en peso) de cada uno de los combustibles es la base para determinar las emisiones de SO_2 .

Tabla 2.3. Factores de emisión para combustión con diesel, gasóleo y combustóleo

Contaminante	Combustóleo (kg/m^3)	Gasóleo (kg/m^3)	Diesel (kg/m^3)
Partículas	2.12 S + 0.34	0.84	0.24
Bióxido de azufre	19 (S)	18 (S)	17 (S)
Monóxido de carbono	0.6	0.6	0.6
Óxidos de nitrógeno	6.6-8	2.4-8	2.4
Compuestos orgánicos totales	0.125-0.193	0.067-0.125	0.03-0.067

Nota: (S) es el porcentaje en peso de contenido de azufre en el combustible.
Poder calorífico: combustóleo (9,980 kcal/l), gasóleo (9,640 kcal/l), diesel (9,300 kcal/l).

c) Factores de emisión para combustión con gas L.P.

En la tabla 2.4 se muestran los factores de emisión del AP-42 para la combustión de gas L.P., considerando dos categorías de equipo de combustión: el industrial, y el comercial y de servicios. Dichos factores se seleccionan en función del mayor contenido de butano o propano en la mezcla gaseosa.

Tabla 2.4. Factores de emisión para combustión con gas L.P.

Contaminante	Unidad industrial (kg/m^3)		Unidad comercial (kg/m^3)	
	Butano	Propano	Butano	Propano
Partículas *	0.07	0.07	0.06	0.05
Bióxido de azufre	0.011(S)	0.012 (S)	0.011 (S)	0.012 (S)
Monóxido de carbono	0.4	0.4	0.3	0.2
Óxidos de nitrógeno	2.5	2.3	1.8	1.7
Compuestos orgánicos totales	0.07	0.06	0.07	0.06

Nota: (S) es el porcentaje en peso de contenido de azufre en el Gas L.P.

* Material particulado filtrable; material particulado colectado en un filtro, de acuerdo al método de muestreo 5 de la EPA o equivalente.

El gas L.P. contiene propano, propileno, butano y butileno. El poder calorífico presenta valores diferentes dependiendo del contenido de la mezcla comercializada: el correspondiente a la de mayor contenido de propano es de 6,090 kcal/l y el de la de mayor contenido de butano es de 6,790 kcal/l.

Factores de emisión para otros procesos diferentes a la combustión.

a) Factores de emisión para fundición de hierro gris

Para la fundición de hierro gris se utilizaron los factores de emisión de la categoría de minerales metálicos del AP-42, los cuales se presentan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Factores de emisión para la producción de hierro gris (kg/ton)

Tipo de horno	Partículas	SO ₂	CO	NO _x	COV
Cubilote:					
Sin control	8.5	0.6 (S)	73		
Capa húmeda	4				
Lavador	2.5				
Lavador de alta eficiencia	0.4	0.3 (S)			
Precipitador electrostático	0.3				
Filtro de bolsa	0.1				
Arco eléctrico	5	No significativo	0.5 a 19	0.02 a 0.3	0.03 a 0.15
Inducción eléctrica	0.75	No significativo	No significativo		
Reverbero	1				

Notas: (S) es el porcentaje en peso de contenido de azufre en el combustible. El valor de SO₂ supone que el 30% del azufre se convierte en SO₂.

En el horno de cubilote aproximadamente el 85% de la carga total es metal; por cada unidad de peso de coque en la carga se producen 7 unidades de peso de hierro gris.

b) Factores de emisión para la aplicación de recubrimientos

Para procesos donde se aplican recubrimientos, pinturas y barnices se utilizaron los factores de emisión del AP-42, los cuales se resumen en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Factores de emisión para aplicación de recubrimientos

Tipo de recubrimiento	COV (kg/ton de recubrimiento)
Pintura	560
Barniz y sellador	500
Laca	770
Esmalte	420
Primer (cromato de zinc)	660

c) Factores de emisión para fabricación de pintura y barniz

En la tabla 2.7 se presentan los factores de emisión del AP-42 de partículas y compuestos orgánicos volátiles (COV) provenientes de la fabricación de pinturas y barnices. Los factores se refieren a los kilogramos de partículas generadas por cada tonelada de pigmento utilizado en la fabricación de pinturas y a los kilogramos de COV emitidos por cada tonelada de recubrimiento producido. La generación de COV está ligada de manera directa con los procesos de mezclado, donde se preparan los recubrimientos, e indirectamente con la cantidad de material volátil contenido en la formulación. El cálculo de las emisiones de COV por la aplicación de recubrimientos se describe en el capítulo 2 de Fuentes de Área.

Tabla 2.7. Factores de emisión para fabricación de pinturas y barnices

Tipo de producto	Partículas (kg/ton de pigmento)	COV (kg/ton de producto)
Pintura	10	15
Barniz		
Base aceite		20
Oleoresina		75
Alquidámica		80
Acrílica		10

Metodología para la estimación de emisiones de partículas menores a 10 micrómetros (PM10).

La estimación de las emisiones de PM10 se llevó a cabo mediante la aplicación de los factores de emisión del AP-42, los cuales consideran la fracción de PM10 contenida en las partículas totales generadas. En la combustión de gas natural y gas L.P. se asume que todas las partículas generadas son PM10. Los factores de emisión utilizados para la combustión de gasóleo, diesel, combustóleo pesado y combustóleo ligero fueron: 0.72, 0.21, 3.98 y 1.03 kg de PM10/m³ de combustible, respectivamente.

Para la estimación de PM10 de otros procesos industriales se consideraron las proporciones de PM10 contenidas en las partículas totales generadas, las cuales se presentan en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Proporción de PM10 en las partículas suspendidas totales

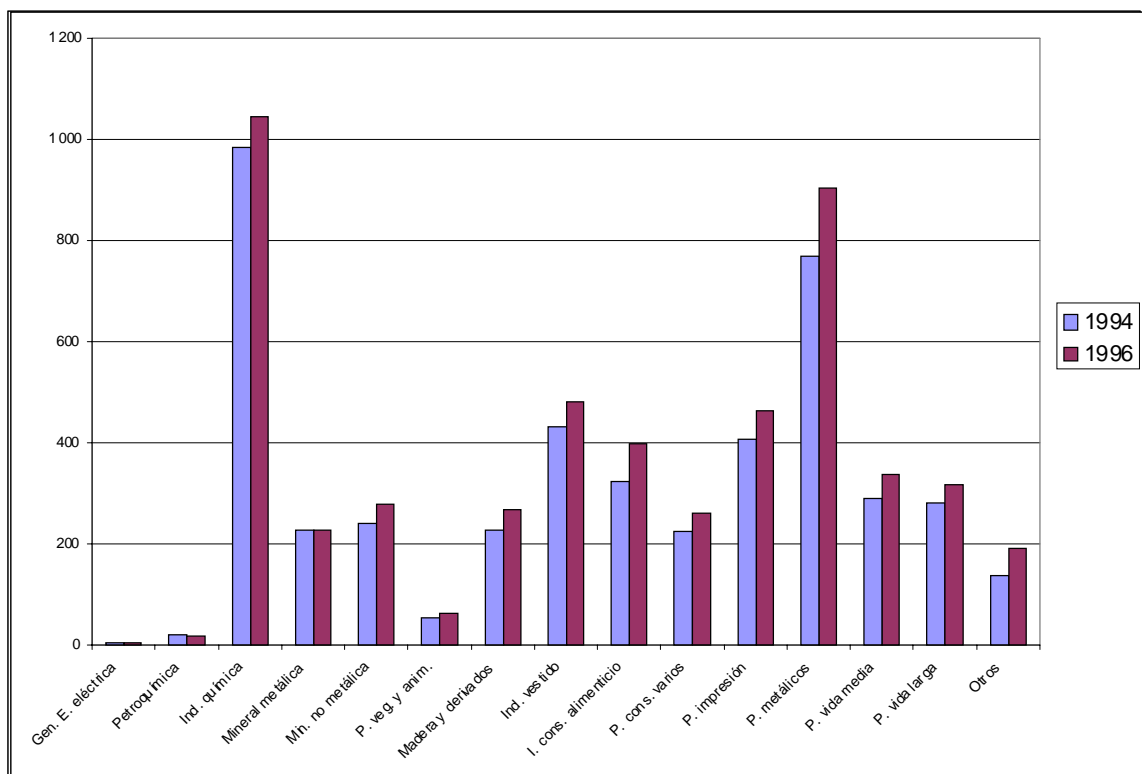
Giro	Porcentaje
Producción de vidrio	94
Producción de envases de vidrio	95
Fabricación de concreto	50
Fabricación de pinturas	85
Fundición de metales	90
Manejo de granos y semillas	15

III. Resultados

Como se mencionó, para el año de 1996 se contó con la información de la Cédula de Operación de 5,255 establecimientos industriales asentados en la ZMVM, los cuales fueron agrupados en 15 giros industriales.

En la gráfica 2.1 se compara el número de establecimientos inventariados en 1994 y 1996, en donde resaltan los giros de la industria química y la de productos metálicos por contar con los mayores números de empresas de la ZMVM; también se aprecia que registraron un incremento significativo en el número de establecimientos reportados al igual que con todos los otros giros, con excepción de los de generación de energía eléctrica, petroquímica y mineral metálica. Por otra parte, las tablas 2.9 y 2.10 presentan los inventarios del sector industrial de 1994 y 1996, respectivamente, y la gráfica 2.2 muestra la comparación de las emisiones totales de ambos inventarios; en esta gráfica las emisiones de partículas que se comparan son las totales (o "PST", como se denominaron en el inventario de 1994), ya que solamente a partir del inventario de 1996 se estimaron las emisiones de partículas menores a 10 micrómetros o PM10.

Gráfica 2.1. Número de establecimientos inventariados en 1994 y 1996



UENTE: Sistema Nacional de Información de Fuentes Fijas, Instituto Nacional de Ecología 1996.

Tabla 2.9. Inventario de emisiones del sector industria de la ZMVM 1994 (ton/año)

GIRO Ton/año	No. de Industrias	PT		SO ₂		CO		NOx		HC	
		Ton/año	%	Ton/año	%	Ton/año	%	Ton/año	%	Ton/año	%
Industria											
Gen. E. eléctrica	4	163	2.6	19	0.1	1,291	14.8	17,855	56.6	97	0.4
Petroquímica	20	7	0.1	85	0.3	5	0.1	28	0.1	158	0.6
Ind. química	984	974	15.3	3,443	13.2	2,601	29.9	2,477	7.9	7,198	29.6
Mineral metálica	227	550	8.7	622	2.4	1,458	16.8	553	1.8	461	1.9
Mineral no metálica	240	1,675	26.3	11,711	45.0	323	3.7	4,934	15.7	3,167	13.0
Prod. vegetales y anim.	55	111	1.7	842	3.2	40	0.5	260	0.8	239	1.0
Madera y derivados	227	384	6.0	3,912	15.0	463	5.3	1,822	5.8	1,442	5.9
Ind. del vestido	432	460	7.2	2,405	9.2	734	8.4	1,091	3.5	605	2.5
Ind. consumo alimenticio	324	799	12.6	2,111	8.1	406	4.7	1,069	3.4	397	1.6
Prod. de consumo varios	225	67	2.1	109	0.4	74	0.9	678	2.2	304	1.3
Prod. de impresión	406	776	12.2	19	0.1	15	0.2	14	< 0.1	5,015	20.6
Prod. metálicos	769	197	3.1	559	2.1	653	7.5	468	1.5	1,548	6.4
Prod. de vida media	291	99	1.6	38	0.1	101	1.2	70	0.2	599	2.5
Prod. de vida larga	282	93	1.5	172	0.7	524	6.0	196	0.6	2,959	12.2
Otros	137	3	< 0.1	5	< 0.1	8	0.1	4	< 0.1	121	0.5
Total	4,623	6,358	100.0	26,052	100.0	8,696	100.0	31,519	100.0	24,310	100.0

FUENTE: Sistema Nacional de Información de Fuentes Fijas, Instituto Nacional de Ecología, 1994.

Tabla 2.10. Inventario de emisiones del sector industria de la ZMVM 1996 (ton/año)

GIRO Ton/año	No. de Industrias	PT		PM10		SO ₂		CO		NOx		HC	
		Ton/año	%	Ton/año	%	Ton/año	%	Ton/año	%	Ton/año	%	Ton/año	%
Industria													
Gen. E. eléctrica	5	294	4.4	294	5.2	103	0.7	797	8.4	12,507	43.6	41	0.3
Petroquímica	19	2	< 0.1	1	< 0.1	5	< 0.1	2	< 0.1	3	< 0.1	7	< 0.1
Ind. química	1,045	936	14.0	743	13.0	2,488	15.9	2,033	21.4	2,212	7.7	4,323	26.6
Mineral metálica	228	567	8.5	513	9.0	691	4.4	1,589	16.7	770	2.7	278	1.7
Mineral no metálica	279	2,383	35.6	1,923	33.7	2,340	15.0	1,103	11.6	4,379	15.3	706	4.3
Prod. vegetales y anim.	63	48	0.7	44	0.8	248	1.6	34	0.4	103	0.4	14	0.1
Madera y derivados	268	435	6.5	377	6.6	4,924	31.5	379	4.0	1,833	6.4	641	3.9
Ind. del vestido	482	435	6.5	381	6.7	2,129	13.6	462	4.9	1,338	4.7	268	1.6

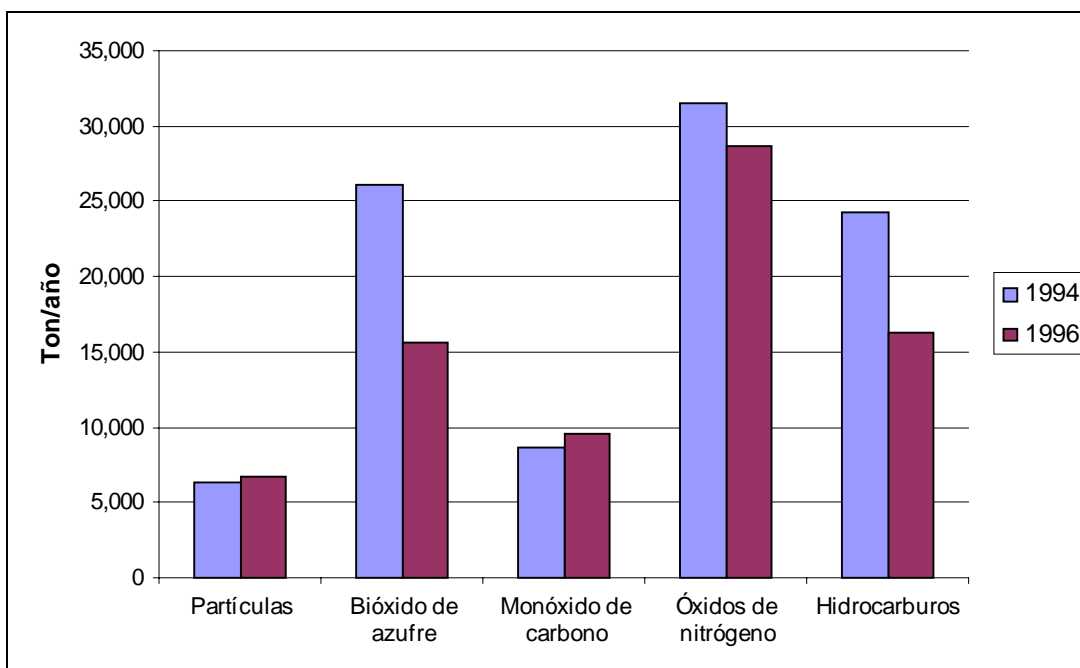
2.- Inventario de Emisiones de Fuentes Puntuales

Ind. consumo alimenticio	397	583	8.7	558	9.8	1,366	8.7	829	8.7	1,408	4.9	605	3.7
Prod. de consumo varios	260	75	2.1	70	1.2	110	0.7	71	0.7	91	0.3	808	5.0
Prod. de impresión	462	45	0.7	37	0.6	18	0.1	22	0.2	53	0.2	3,214	19.7
Prod. metálicos	904	278	4.2	251	4.4	749	4.8	1,155	12.2	2,717	9.5	2,194	13.5
Prod. de vida media	336	163	2.4	149	2.6	73	0.5	196	2.1	564	2.0	747	4.6
Prod. de vida larga	316	396	5.9	309	5.4	277	1.8	809	8.5	611	2.1	2,346	14.4
Otros	191	53	0.8	51	0.9	111	0.7	22	0.2	78	0.3	88	0.5
Total	5,255	6,693	100.0	5,701	100.0	15,632	100.0	9,503	100.0	28,667	100.0	16,280	100.0

FUENTE: Sistema Nacional de Información de Fuentes Fijas, Instituto Nacional de Ecología, 1996.

Comparando los inventarios de 1994 y 1996, se observa una reducción del 9%, 40% y 33% en las emisiones totales anuales de óxidos de nitrógeno, bióxido de azufre e hidrocarburos respectivamente, posiblemente debido al mejoramiento de la calidad y sustitución de combustibles empleados en el sector. Por otro lado, tanto las partículas totales como el monóxido de carbono incrementaron ligeramente sus emisiones anuales para 1996, en un 5% y 9%, respectivamente.

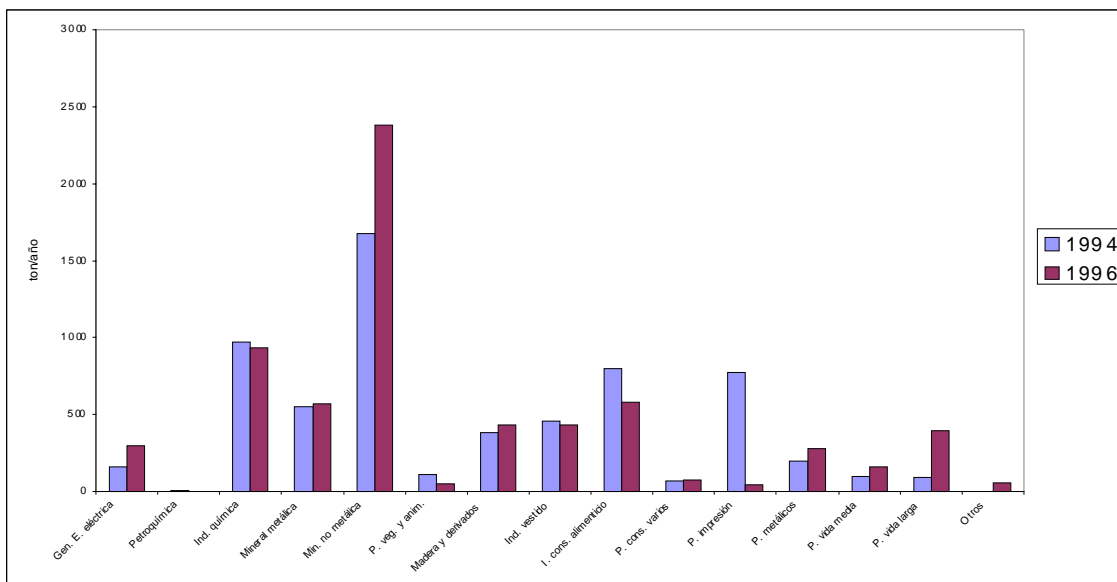
Gráfica 2.2. Comparación de las emisiones de los inventarios de fuentes puntuales 1994 y 1996



FUENTE: Sistema Nacional de Información de Fuentes Fijas, Instituto Nacional de Ecología.

Analizando los giros que tienen un mayor aporte de cada contaminante, se encontró que con relación a las partículas, el giro de la industria mineral no metálica presenta la mayor contribución de este contaminante, tanto en 1994 como en 1996; en este último fue de un 36% de las emisiones del sector, es decir de 2,383 ton/año (gráfica 2.3). Este mismo giro también contribuye mayoritariamente a las emisiones de PM10 del sector industrial con casi un 34%.

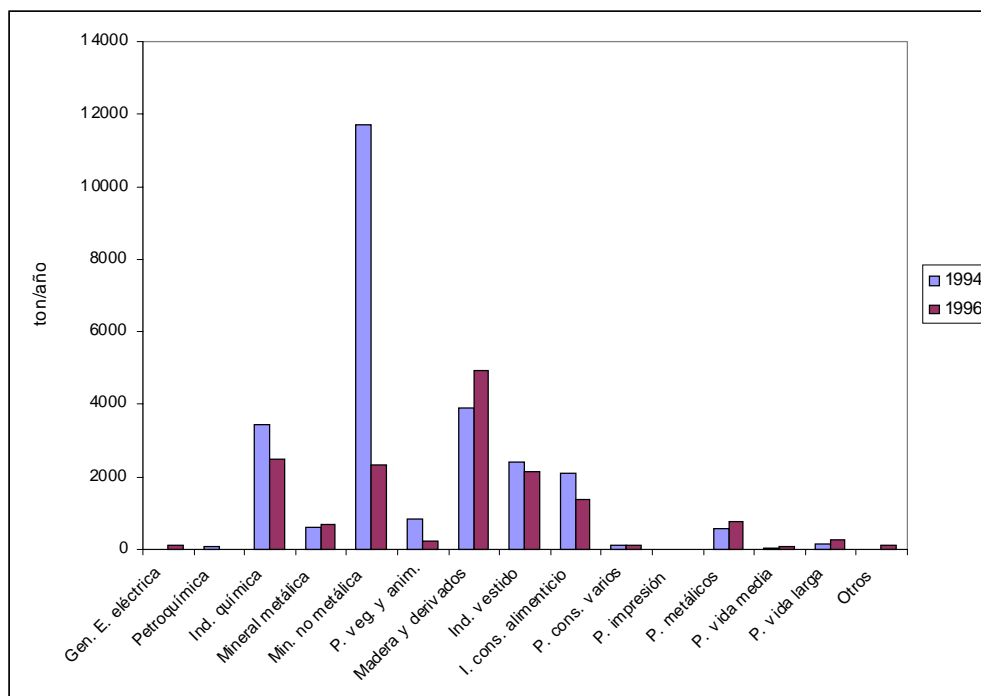
Gráfica 2.3. Emisiones de partículas totales en el sector industria



FUENTE: Sistema Nacional de Información de Fuentes Fijas, Instituto Nacional de Ecología.

Para el caso del bióxido de azufre (gráfica 2.4), en 1994 la industria mineral no metálica contribuyó con el 45% de las emisiones, mientras que en 1996 la industria con mayor contribución fue la de madera y derivados, que participó con el 31% del total de emisiones de este contaminante (4,924 ton/año).

Gráfica 2.4. Emisiones de bióxido de azufre en el sector industria

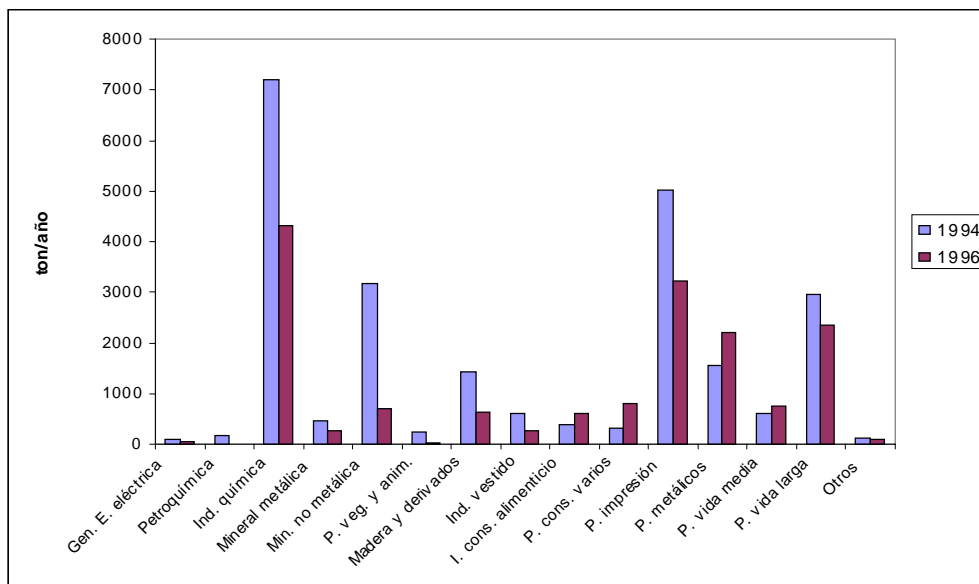


FUENTE: Sistema Nacional de Información de Fuentes Fijas, Instituto Nacional de Ecología.

En lo que respecta a los hidrocarburos (HC), existe una reducción notable de las emisiones del sector en 1996, de 8,030 toneladas anuales (cerca del 30% de las emisiones de HC), con respecto a 1994. Los giros que redujeron en forma importante sus emisiones de este contaminante fueron la industria química, la mineral

no metálica y los productos de impresión (gráfica 2.5); la primera disminuyó su porcentaje de aportación de emisiones al sector en un 3%.

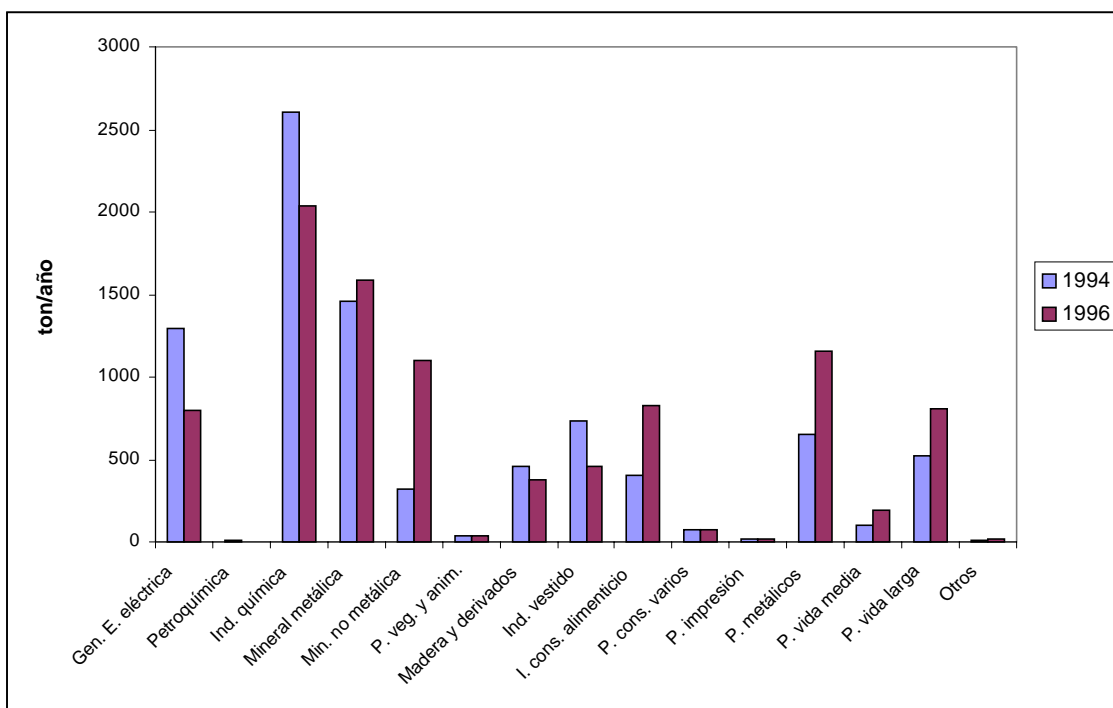
Gráfica 2.5. Emisiones de hidrocarburos en el sector industria



FUENTE: Sistema Nacional de Información de Fuentes Fijas, Instituto Nacional de Ecología.

Para el monóxido de carbono (CO), la industria química disminuyó su porcentaje de contribución del 30% en 1994 al 21% en 1996. Sin embargo, hubo giros industriales que incrementaron sus emisiones anuales, tales como la industria mineral no metálica, la industria mineral metálica, la industria de consumo alimenticio, los productos metálicos y los productos de vida media y larga (gráfica 2.6).

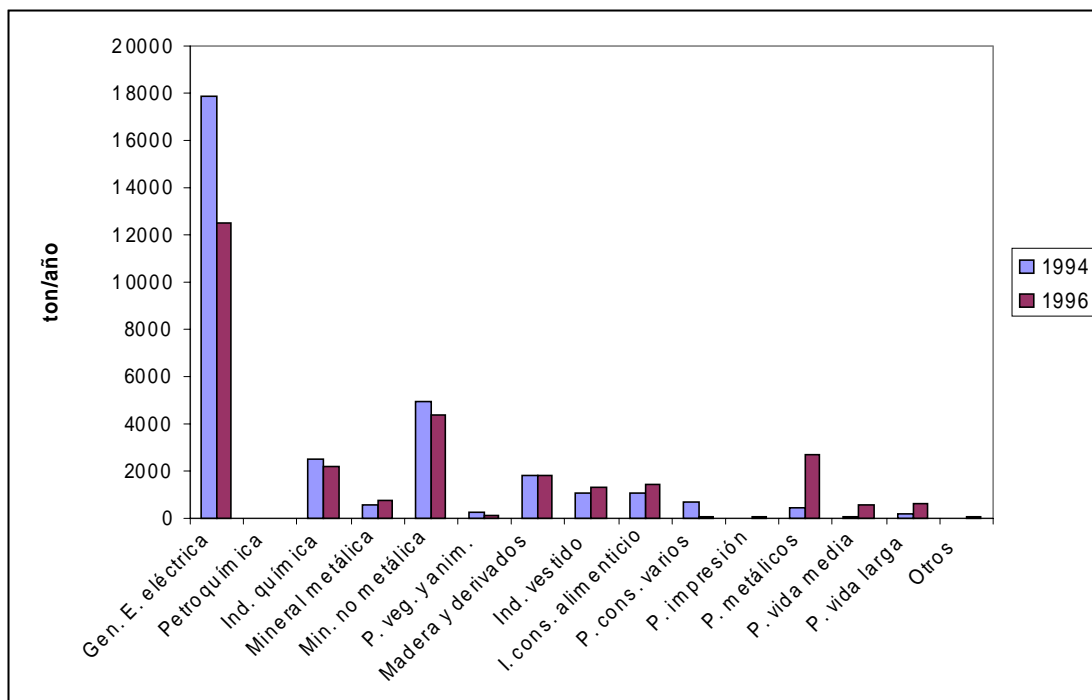
Gráfica 2.6. Emisiones de monóxido de carbono en el sector industria



FUENTE: Sistema Nacional de Información de Fuentes Fijas, Instituto Nacional de Ecología 1994 - 96.

Con respecto a las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), en 1996 se tuvo una reducción de 9%, en comparación al inventario de 1994. Los giros que contribuyen de manera importante en la emisión de este contaminante son la generación de energía eléctrica, la industria mineral no metálica y los productos metálicos (gráfica 2.7). La generación de energía eléctrica es el principal aportador de óxidos de nitrógeno, aún cuando disminuyó su participación porcentual de 57% que tenía en 1994, a 44% en 1996 (12,507 ton/año).

Gráfica 2.7. Emisiones de óxidos de nitrógeno en el sector industria



FUENTE: Sistema Nacional de Información de Fuentes Fijas, Instituto Nacional de Ecología 1994-96.

Con el fin de clasificar a las empresas de acuerdo a la magnitud de sus emisiones de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos, compuestos precursores de los oxidantes fotoquímicos, se elaboró la tabla 2.10, en la cual se incluyen a las 5,255 empresas consideradas par la elaboración del presente inventario.

Tabla 2.10. Ordenación de empresas de la ZMVM según volumen de emisiones de NOx y HC

Grupo	Estratos de emisión (ton/año)	No. de empresas	% de empresas respecto al total	Emisión (ton/año)		Total (NOx+ HC)	% de emisión respecto al total del sector
				NOx	HC		
A	> 1	883	17	26,391	14,809	41,200	92
B	> 3	564	11	26,109	14,722	40,831	91
C	> 5	469	9	25,594	14,572	40,166	89
D	> 10	305	6	24,645	14,298	38,943	87
E	> 20	201	4	23,621	13,880	37,501	83
F	> 30	148	3	22,877	13,330	36,207	81
G	> 60	88	2	21,633	12,068	33,701	75
H	> 90	71	1	21,402	11,030	32,432	72
I	> 120	55	1	20,806	10,003	30,809	69
J	> 150	47	1	20,806	8,821	29,626	66

Número total de empresas de la base de datos..... 5,255
 Emisión total (NOx + HC) (ton/año)..... 44,945

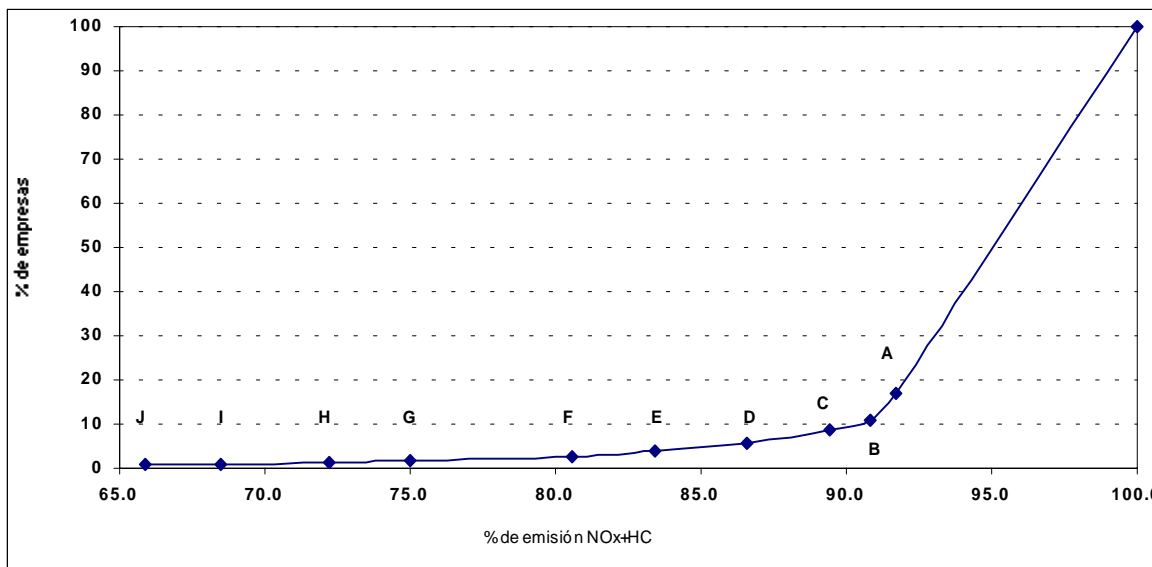
Emisiones totales NOx (ton/año)..... 28,667
 Emisiones totales HC (ton/año)..... 16,279

La tabla presenta 10 estratos (grupos) de empresas de acuerdo al nivel de emisiones indicado en la segunda columna. El grupo A, está constituido por las 883 empresas cuyos niveles individuales de emisión son mayores a 1 tonelada anual; el grupo B, incluye a las empresas subsecuentes y está formado por 564 establecimientos con emisiones mayores a 3 ton/año, y así sucesivamente.

Esta forma de organizar la información contenida en la tabla, permite observar que las 883 empresas del grupo A representan un volumen de 41,200 ton/año de precursores de ozono, es decir el 92% de las emisiones totales del sector industrial. Asimismo, y siguiendo con este razonamiento, se puede observar que basta con incluir a las 201 empresas más contaminantes para incluir cerca del 83% de las emisiones totales de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos producidos por la industria en su conjunto.

El sesgo en la distribución de emisiones de precursores de ozono del sector industrial puede observarse claramente en la gráfica 2.8. El punto A representa el 17% de las empresas que generan el 92% de los precursores de ozono en el sector industrial. El 8% restante, corresponde a las emisiones producidas por el otro 83% de las empresas.

Gráfica 2.8. Contribución de las industrias a las emisiones de HC y NOx



Efectuando el mismo tipo de análisis a las emisiones de PM10 (tabla 2.11), se puede apreciar que las 572 empresas del estrato A (que emiten individualmente más de media tonelada por año de PM10), representan un volumen de 4,472 ton/año de PM10, es decir el 78% de las emisiones de PM10 que emite la industria. Asimismo, y siguiendo con este razonamiento, se puede observar que basta con incluir a las 122 empresas más contaminantes para abarcar cerca del 65% de las emisiones totales de partículas producidas por la industria en su conjunto.

Finalmente se puede mencionar que 4,683 establecimientos generan el 22% de las emisiones de PM10, mostrando con ello el sesgo en la contribución de las

emisiones del sector. En comparación con la distribución de las emisiones de NOx+HC, la distribución de PM10 es menos sesgada, ya que hay un mayor número de empresas que contribuyen en mayor medida a las emisiones de este contaminante.

Tabla 2.11. Ordenación de Empresas de la ZMVM según volumen de emisiones de PM10

Grupo	Estratos de emisión ton/año	No. de empresas	% de empresas respecto al total	Emisión (ton/año)	% de emisión respecto al total del sector
A	> 0.5	572	10.9	4,472	78
B	> 1	440	8.3	4,375	77
C	> 1.5	347	6.6	4,265	75
D	> 2	300	5.7	4,185	73
E	> 3	219	4.1	3,989	70
F	> 4	185	3.5	3,876	68
G	> 6	122	2.3	3,563	63

Número total de empresas de la base de datos.....5,255

Emisión total (PM10) (ton/año)..... 5,700

3. Inventario de Emisiones de Fuentes de Área

I. Generalidades

Las fuentes de área son todos aquellos establecimientos, servicios o actividades que en forma individual emiten cantidades pequeñas de contaminantes, pero que en conjunto representan una cantidad importante de ellos y que no llegan a considerarse como fuentes puntuales. Los principales contaminantes que emiten son los compuestos orgánicos volátiles, además de los gases de combustión. Como ejemplo de este tipo de fuentes se pueden mencionar los hogares, los talleres mecánicos, los hoteles, las tintorerías, los baños públicos, las panaderías, los hospitales y el almacenamiento de combustibles, entre otras.

El cálculo de las emisiones de las fuentes de área se realizó empleando los siguientes métodos: factores de emisión, modelos matemáticos y sistematización en hojas de cálculo.

Factores de emisión. Un factor de emisión refleja la cantidad de un contaminante que es emitido al realizar una actividad. En el caso de las fuentes de área, el factor considera la cantidad de materia prima consumida, la cantidad de producto elaborado, el consumo de combustible, el número de empleados y la densidad de población, entre otros datos.

Modelos matemáticos. Son programas de cómputo desarrollados con fines específicos para calcular las emisiones de ciertos tipos de contaminantes. Dependiendo del modelo a utilizar se requerirá información relacionada con las características y parámetros de operación de los equipos, tales como: tipos de calderas, tanques de almacenamiento, tipo de locomotoras, entre otros; asimismo, los modelos requieren de: información meteorológica, geográfica, de uso de suelo, altitud, cantidad y tipo de combustibles utilizados, kilómetros recorridos y características físicoquímicas de los materiales. Por ejemplo, el programa TANKS 3.0 se utiliza para estimar las emisiones por evaporación en diversos tipos de tanques de almacenamiento de combustible.

Sistematización en hojas de cálculo. Una hoja de cálculo contiene una serie de fórmulas para obtener valores aproximados de las emisiones a la atmósfera originadas por determinados procesos. Dependiendo del análisis que se desee realizar, es necesario obtener información sobre población, número de obreros y empleados, materiales utilizados, factores de emisión, etc.

Es relevante mencionar que durante el desarrollo del inventario de emisiones de fuentes área de 1994, se consideraron los factores de emisión de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (EPA)¹, mientras que en la

¹ Environmental Protection Agency (1991). Compilation of Air Pollutant Emissions Factors. AP-42. EPA/4504-91-016. Vol.I y II.

actualización del inventario 1996, además de retomar los factores de emisión actualizados de la EPA², se utilizaron factores de emisión locales.

Para el desarrollo de los factores de emisión locales, se requieren conocer las características de la actividad productiva y las condiciones de operación de los equipos utilizados. Con los factores locales se pretende incrementar la confiabilidad del cálculo de las emisiones. Adicionalmente, esta información permitirá contar con elementos para establecer límites de emisión y elaborar normas para las principales fuentes de área.

La información necesaria para el desarrollo de los factores de emisión locales y los datos de actividad fue generada mediante la aplicación de encuestas, así como por consultas de informes y bases de datos publicados en diferentes medios. La solicitud de información fue requerida para las siguientes categorías y subcategorías de fuentes:

Tabla 3.1. Clasificación de las fuentes de área

Pérdidas evaporativas por transporte y almacenamiento de combustible.

Distribución y almacenamiento de gasolina
Carga en aeronaves
Almacenamiento de combustibles

Evaporación de solventes por fuentes de área.

Lavado en seco
Limpieza y desengrase
Artes gráficas
Consumo comercial de solventes
Recubrimientos industriales
Superficies arquitectónicas
Pintura automotriz
Pintura de tránsito
Esterilización en hospitales
Incineración de residuos hospitalarios

Fuentes evaporativas de hidrocarburos.

Rellenos sanitarios
Tiraderos a cielo abierto
Distribución de gas L.P.
Uso de asfalto
Panaderías
Plantas de tratamiento de agua residual

Fuentes móviles no carreteras.

Locomotoras foráneas
Locomotoras de patio
Aeropuerto (operaciones de aeronaves)

Fuentes de combustión.

Combustión habitacional
Combustión comercial-institucional

² Environmental Protection Agency (1995). Compilation of Air Pollutant Emissions Factors. AP-42. Vol.I y II.

II. Metodología

Pérdidas evaporativas por transporte y almacenamiento de combustible

Las pérdidas evaporativas por transporte y almacenamiento de combustible son hidrocarburos que se emiten a la atmósfera por fugas durante la distribución y el almacenamiento de gasolina, la carga de aeronaves y el almacenamiento de combustible. La estimación de las emisiones generadas en esta categoría se desarrolló por subcategoría. La tabla 3.2 muestra los métodos de cálculo utilizados.

Tabla 3.2. Métodos de cálculo para pérdidas evaporativas por transporte y almacenamiento de combustible

Subcategoría	Método de cálculo
Distribución y almacenamiento de gasolina	Hoja de cálculo para la distribución de gasolina
Carga en aeronaves	Hoja de cálculo de recarga de combustible de aeronaves
Almacenamiento de combustibles	Programa TANKS v. 3.0

Las hojas de cálculo forman parte de la metodología contenida en el documento *Procedimientos para la preparación del inventario de emisiones para monóxido de carbono y precursores de ozono* de la EPA³. Los factores de emisión para las subcategorías de distribución y almacenamiento de gasolina, pérdidas de transporte, almacenamiento y carga en las estaciones de servicio, así como la carga de aeronaves fueron tomados del AP-42⁴. La información relacionada con los parámetros de los combustibles tiene su origen en los reportes proporcionados por Pemex.

La estimación de emisiones por almacenamiento masivo de combustibles, considera las modificaciones realizadas en las terminales de almacenamiento de la ZMVM, tales como la incorporación de diferentes tipos de techos en los tanques, que mejoran el control de las emisiones evaporativas de combustibles, y la instrumentación de los mismos. En el caso de los tanques de las gasolineras, se consideró el llenado por inmersión, que es parte del *Programa de Recuperación de Vapores*, que tiene como objeto disminuir las emisiones en los grandes tanques de almacenamiento, durante el transporte de combustible y en las estaciones de servicio.

³ Environmental Protection Agency (1990). New York Ozone Nonattainment Counties.

⁴ Environmental Protection Agency (1992). Compilation of Air Pollutant Emissions Factors. AP-42. Vol. I.

Evaporación de solventes por fuentes de área

Las fuentes de evaporación incluyen las emisiones de hidrocarburos en actividades de lavado en seco, limpieza y desengrase, artes gráficas, consumo comercial de solventes, uso de pinturas en general e incineración de residuos hospitalarios.

La emisión de hidrocarburos por evaporación de solventes, en este caso de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), considera las características propias de cada subcategoría. Por ejemplo, en el caso de lavado en seco y limpieza y desengrase, la emisión de hidrocarburos se lleva a cabo al utilizar el solvente durante el desarrollo de estas actividades. Para las artes gráficas, el consumo comercial de solventes, la pintura de tránsito, los recubrimientos arquitectónicos e industriales, se utilizó el porcentaje de hidrocarburos contenidos en los productos, al igual que en el adelgazamiento de las pinturas y barnices para la aplicación de los recubrimientos. Aquí también hay que considerar las emisiones de hidrocarburos por combustión en la incineración de residuos hospitalarios.

En la tabla 3.3 se muestran los factores de emisión elaborados por la EPA y los factores locales desarrollados para la ZMVM, con base en la siguiente información:

- λ Ventas de recubrimientos y contenido de solventes (proporcionados por la Asociación Nacional de Fabricantes de Pinturas y Tintas, ANAFAPYT);
- λ Consumo local de solventes, de thinner, de gas nafta, de percloroetileno; y
- λ Datos de población para cada delegación o municipio.

Tabla 3.3. Factores de emisión por subcategorías de evaporación de solventes

Subcategoría	Factor de emisión (kg/hab/año)
Lavado en seco	*0.60
Limpieza y desengrase	*1.80
Artes gráficas	**0.40
Uso comercial de solventes	*2.86
Recubrimientos industriales	**1.28
Recubrimientos arquitectónicos	**1.36
Panaderías	*0.155
Pintura automotriz	**0.1369
Pintura de tránsito.	**0.04

* Environmental Protection Agency (1992). Compilation of Air Pollutant Emissions Factors. AP-42. Vol. I.

** Factores locales desarrollados por el GDF.

En el caso del lavado en seco, para el cálculo de las emisiones en el Distrito Federal realizado en 1994, se utilizó un factor de emisión de la EPA de 0.82 kg/hab/año. En el presente inventario se utilizó un factor de emisión corregido por EPA de 0.6 kg/hab/año⁵.

⁵ EPA (1995). *Op. cit.*

Para el cálculo de las emisiones en la aplicación de pintura automotriz, en 1994 se utilizó un factor de emisión de 0.41 kg/hab/año obtenido por la EPA. Este factor fue sustituido por un factor local de emisión de 0.1369 kg/hab/año.

Otro de los factores locales desarrollados fue el de la subcategoría de pintura de tránsito; el factor empleado en 1994 fue de 0.227 kg/hab/año, que se cambió por un factor local de 0.04 kg/hab/año en 1996.

Fuentes evaporativas de hidrocarburos

Las emisiones evaporativas de hidrocarburos se generan durante los procesos de descomposición de la basura, los procesos de tratamiento de agua residual, la distribución de gas L.P. y en la elaboración de pan.

En esta categoría se aplicó el modelo denominado LANDFILL⁶ para obtener las emisiones provenientes de las subcategorías rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto, mientras que para las plantas de tratamiento de aguas residuales se aplicó el modelo SIMS⁷, considerando los criterios contenidos en el AP-42 y datos proporcionados por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Distrito Federal.

La emisión originada por la distribución de gas L.P. fue estimada por Pemex Gas y Petroquímica Básica, a través del estudio Efecto de los componentes del gas licuado de petróleo en la acumulación de ozono en la atmósfera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México⁸ en el que se consideró el análisis de los siguientes aspectos:

- λ Emisiones por medición de niveles;
- λ Emisiones por desacoplamiento;
- λ Emisiones por purgado de equipos;
- λ Emisiones anormales como fugas, escapes, sobrellenos, descargas, etc.

Las emisiones por uso y aplicación de asfalto se calcularon a partir de la información proporcionada por la Planta de Asfalto del Distrito Federal la cual está referida al consumo por delegación. Las especificaciones de hidrocarburos contenidos en el asfalto fueron proporcionadas por Pemex (0.34% en peso de compuestos orgánicos volátiles)⁹. En el caso del Estado de México, se aplicó un factor per cápita promedio a partir de la información del Distrito Federal (0.006 kg/hab/año).

⁶ Environmental Protection Agency (1994). LANDFILL Model.

⁷ Environmental Protection Agency (1990). Background document for the Surface Impoundment Modeling System, SIMS. Version 2.0. PA-450/4-90019b.

⁸ Pemex- Gas y Petroquímica Básica (1997). Efecto de los componentes del gas licuado de petróleo en la acumulación de ozono en la atmósfera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

⁹ Pemex - Refinación. Datos típicos. Asfalto no. 6. Refinería Madero.

Para las panaderías, la emisión de hidrocarburos es el resultado de la elaboración del pan durante las etapas de fermentación, esponjamiento y cocido, además de los generados por la combustión (tabla 3.3).

Fuentes móviles no carreteras

Las fuentes móviles no carreteras son aquellas que no circulan en caminos o calles y que se encuentran en áreas limitadas; entre las más importantes se encuentran las locomotoras, las aeronaves, la maquinaria de construcción, las podadoras de pasto, los barcos y lanchas de motor, entre otros. En este inventario se determinaron únicamente las emisiones provenientes de locomotoras y aeronaves.

Para el cálculo de las emisiones de locomotoras foráneas y locomotoras de patio se emplearon las hojas de cálculo y los factores de emisión desarrollados por la EPA^{10,11,12,13}.

La información recopilada para estimar la emisión de las locomotoras consideró el número de unidades, el consumo de combustible por locomotora y el kilometraje recorrido. La información del kilometraje fue obtenida de un mapa Guía Roji, escala 1:45,000 y los datos de actividad fueron proporcionados por Ferrocarriles Nacionales de México.

Para la subcategoría operación de aeronaves se utilizó el programa FAED2.1¹⁴. La información fue proporcionada por Aeropuertos y Servicios Auxiliares de la Ciudad de México y consistió en el número de vuelos, tipos de aeronaves, tipos de motores, tiempos para las maniobras de aterrizaje, despegue y rodamiento (que es la acción de aproximación de la aeronave a la plataforma de desembarque una vez que se concluyó el aterrizaje). Otro dato necesario es el tiempo de aproximación, que se refiere al momento en que la aeronave comienza a ubicarse para iniciar el descenso.

Fuentes de combustión

La categoría de fuentes de combustión contempla las emisiones generadas por la combustión de gas licuado de petróleo, gas natural, diesel y gasóleo en casas habitación y en los servicios e instituciones como son: los baños públicos, los hoteles, las panaderías, las tortillerías, los hospitales y los centros deportivos.

¹⁰ Environmental Protection Agency (1990). Con90.wk1. Ozone Season Emissions from Line Haul Locomotives.

¹¹ Environmental Protection Agency (1990). New York Ozone Nonattainment Counties: Yard Locomotive Ozone Precursors Emissions.

¹² Environmental Protection Agency (1985). Compilation of Air Pollutant Emissions Factors. AP-42. Vol. II.

¹³ Environmental Protection Agency (1992). Procedures for Emissions Inventory Preparation. Volume IV: Mobile sources.

¹⁴ Federal Aviation Administration (1998). Aircraft Engine Emissions User Guide and Database. FAED v2.1.

El cálculo de las emisiones toma en cuenta la cantidad de combustible y distribución porcentual de la población en las distintas áreas de la Zona Metropolitana del Valle de México. En el caso de la subcategoría combustión habitacional, se obtuvo un índice ponderado de ingreso en las diferentes delegaciones y municipios, asumiendo que a mayor ingreso, mayor es el consumo de combustible.

En cuanto a las emisiones por combustión de la subcategoría comercial institucional, el análisis se realizó tomando en cuenta el consumo de combustibles de cada sector y la distribución de los establecimientos de servicios por delegación o municipio¹⁵.

En las siguientes tablas, se muestran los factores de emisión por subcategoría y tipo de combustible.

Tabla 3.4. Factores de emisión para combustión habitacional

Contaminante	Gas natural (kg/10 ⁶ m ³)	Gas L.P. (kg/m ³)
Partículas	72	0.11
Óxidos de azufre	9.6	0.00019 (S)
Monóxido de carbono	320	0.5
Óxidos de nitrógeno	1600	3.5
Hidrocarburos	128	0.13

(S) representa el contenido de azufre en porcentaje en peso en el combustible.

Fuente: Environmental Protection Agency (1995). Compilation of Air Pollutant Emissions Factors. AP-42. Vol. I.

Tabla 3.5. Factores de emisión para combustión comercial/institucional

Contaminante	Gas natural (kg/10 ⁶ m ³)	Diesel (kg/m ³)	Gas L.P. (kg/m ³)	Gasóleo (kg/m ³)
Partículas	72	0.24	0.11	0.84
Partículas menores a 2.5 micras	120	0.03	< 0.01	0.193
Óxidos de azufre	9.6	0.85	0.00019	36
Monóxido de carbono	320	0.6	0.5	0.6
Óxidos de nitrógeno	1600	2.4	3.5	2.4
Hidrocarburos	128	0.067	0.13	0.067

Fuente: Environmental Protection Agency (1995). Compilation of Air Pollutant Emissions Factors. AP-42. Vol. I.

¹⁵ Canadian International Development Agency (1994). Control of Atmospheric Emissions from Service Facilities in the Mexico City Metropolitan Area.

Tabla 3.6. Factores de emisión para esterilización en hospitales

Contaminante	No. de causas	Factor de emisión (kg/cama/año)
	Más de 500	0.82
Compuestos orgánicos volátiles	Mas de 200 y menos de 500	0.59
	Menos de 200	0.77

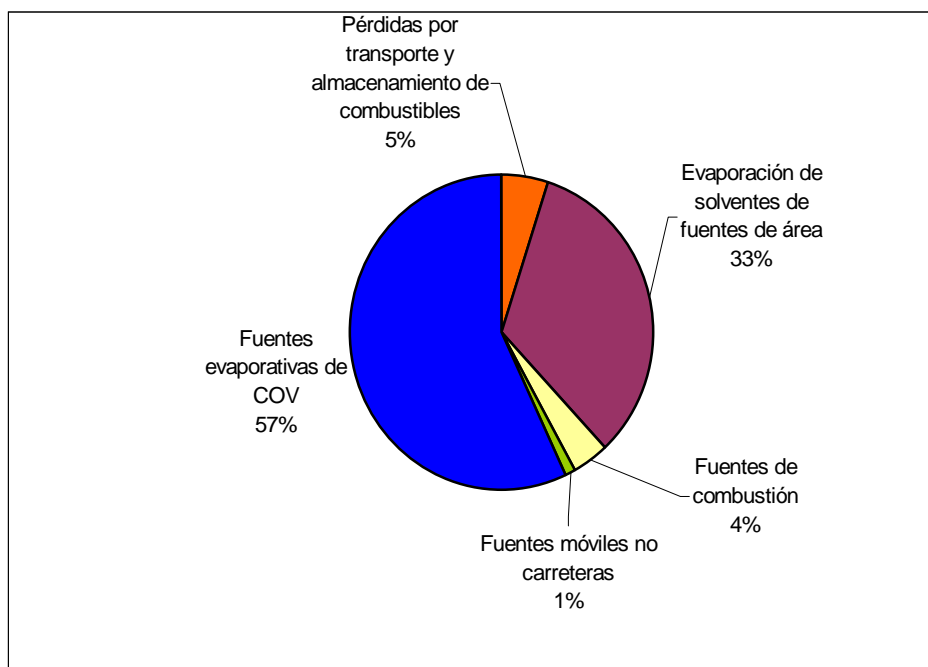
Fuente: Environmental Protection Agency (1995). Compilation of Air Pollutant Emissions Factors. AP-42. Vol.I.

III. Resultados

A efecto de realizar una comparación entre los inventarios de 1994 y 1996, se presentan primero ambos inventarios por separado. Más adelante, se hace el análisis de emisiones por subcategoría, manifestando las consideraciones que se tomaron en cuenta para realizar cada uno de los cálculos.

En la gráfica 3.1 se presenta la contribución de emisiones a la atmósfera, por categoría de fuentes de área para 1994; se puede observar que el 90% de las emisiones provienen de las categorías de evaporación de solventes de fuentes de área y fuentes de evaporación de COV.

Gráfica 3.1. Contribución porcentual de emisiones generadas por las fuentes de área 1994.



Fuente: Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000.

Las emisiones por categoría y subcategoría consideradas en el inventario de 1994 se presentan en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Inventario de emisiones de fuentes de área 1994 (ton/año)

Tipo de fuente	PST	SO ₂	CO	NOX	HC
Perdidas por transporte y almacenamiento de combustible					
Almacenamiento y distribución de gasolina	0	0	0	0	20,127
Carga de aeronaves					31
Almacenamiento masivo de gasolina*					543
Fuentes de evaporación de fuentes de area					
Lavado en seco (tintorerías)	0	0	0	0	12,213
Lavado y desengrase	0	0	0	0	29,044
Artes gráficas**	0	0	0	0	8,788
Consumo de solventes	0	0	0	0	42,005
Recubrimientos Industriales de superficie*	0	0	0	0	0
Superficies arquitectónicas	0	0	0	0	21,598
Panaderías	0	0	0	0	2,291
Pintura automotriz	0	0	0	0	5,976
Pintura de tránsito	0	0	0	0	3,381
Esterilización en hospitales	0	0	0	0	20
Incineración en hospitales	0	0	<1	<1	0
Uso de asfalto	0	0	0	0	19,095
Plantas de tratamiento de agua residual	0	0	0	0	56
Fuentes evaporativas					
Rellenos sanitarios*					
Comercialización y distribución de Gas L.P.					242,272
Tiraderos a cielo abierto*					
Fuentes de combustión					
Combustión residencial	372	1,483	730	3,808	290
Combustión comercial/institucional	697	5,713	200	1,457	61
Combustión en hospitales	8	20	18	74	3
Fuentes móviles no carreteras					
Locomotoras foráneas***	39	26	51	414	17
Locomotoras de patio***	25	37	52	294	30
Aeropuerto (Número de Operaciones de Vuelo)***	0	0.00	1,583	1,295	523

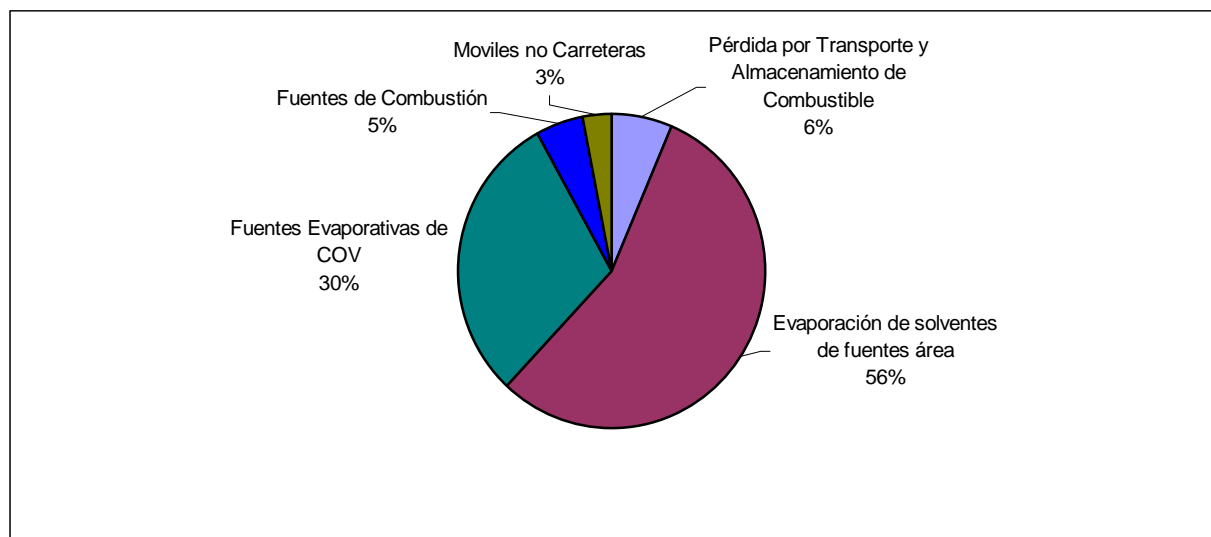
* Estas subcategorías no se incluyeron en el inventario de emisiones de 1994 publicado en el ProAire; fueron estimadas posteriormente con fines de comparación con el inventario de 1996. En el cálculo se utilizó el Volumen V. Area Source Inventory Development, Emissions Inventory Program for Mexico, preparado por Radian International en octubre 1996. Estas categorías se consideraron como fuentes de área para el inventario de 1996.

** Esta subcategoría fue considerada como fuente puntual en el inventario de emisiones de 1994.

*** Estas categorías fueron consideradas como fuentes móviles en el inventario de emisiones de 1994.

En la gráfica 3.2, se presenta la contribución porcentual de emisiones de fuentes de área a la atmósfera durante 1996; en ella se observa que la categoría evaporación de solventes por fuentes de área contribuye con el mayor porcentaje de emisiones (56%).

Gráfica 3.2. Contribución porcentual de las emisiones generadas por las fuentes de área 1996



En la tabla 3.10, se presentan las emisiones por categoría y subcategorías para el inventario de 1996.

Tabla 3.10. Inventario de emisiones de fuentes de área 1996 (ton/año)

	Partículas	PM10	SO ₂	CO	NO _x	HC
Pérdidas por transporte y almacenamiento de combustible						
Distribución de gasolina						16,363
Carga de aeronaves						8
Almacenamiento masivo de gasolina						97
Evaporación de solventes de fuentes de área						
Lavado en seco (tintorerías)						9,830
Limpieza y desengrase						29,490
Artes gráficas						6,553
Comercial de solventes						46,856
Recubrimientos industriales de superficie						20,970
Superficies arquitectónicas						22,281
Pintura automotriz						2,243
Pintura de tránsito						655
Esterilización en hospitales						20
Incineración (residuos hospitalarios)						2
Fuentes evaporativas de COV						
Rellenos sanitarios						119
Distribución de gas L.P.						76,414
Tiraderos a cielo abierto						25
Uso de asfalto						100
Panaderías						2,539
Tratamiento de agua residual						42
Fuentes de combustión						

3.- Inventario de Emisiones de Fuentes de Area

Combustión habitacional	186	1	846	5,880	221
Combustión comercial/institucional	166	3,586	332	1,952	73
Fuentes móviles no carreteras					
Locomotoras foráneas	No estimado	40	43	381	15
Locomotoras de patio	No estimado	362	90	509	51
Aeropuertos (número de operaciones de vuelo)			3,215	2,284	859

A continuación se presentaran los resultados por categoría y subcategoría, así como una comparación entre los inventarios de emisiones de 1994 y 1996,

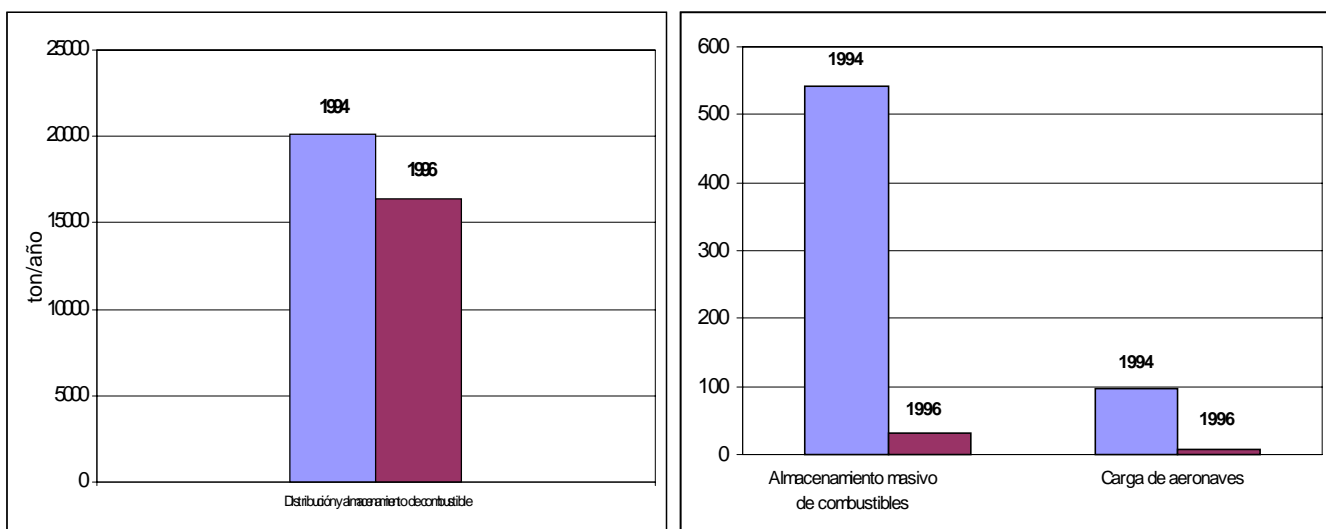
Pérdidas evaporativas por transporte y almacenamiento de combustible

Esta categoría contribuye con el 7% de las emisiones totales de las fuentes de área (16,363 ton/año). Se puede apreciar que la distribución y almacenamiento de combustibles presenta la mayor emisión en comparación con las subcategorías de almacenamiento masivo de combustibles y carga de aeronaves.

En la gráfica compuesta 3.3, se observa que las emisiones generadas por esta categoría son menores en 1996 comparadas con las producidas en el año de 1994. Las causas probables que explican esta disminución son:

- λ Disminución del número de vuelos de carga en el aeropuerto de la Ciudad de México;
- λ Instrumentación de la Fase 0 del *Programa de Recuperación de Vapores*, es decir, la instalación de sistemas de recuperación de vapores en tanques de almacenamiento masivo y autotanques;
- λ Disminución en el consumo combustibles;
- λ Instalación de techos flotantes en los tanques de almacenamiento.

Gráfica 3.3. Comparación de los inventarios de emisiones 1994 y 1996 para la categoría pérdidas por transporte y almacenamiento de combustible

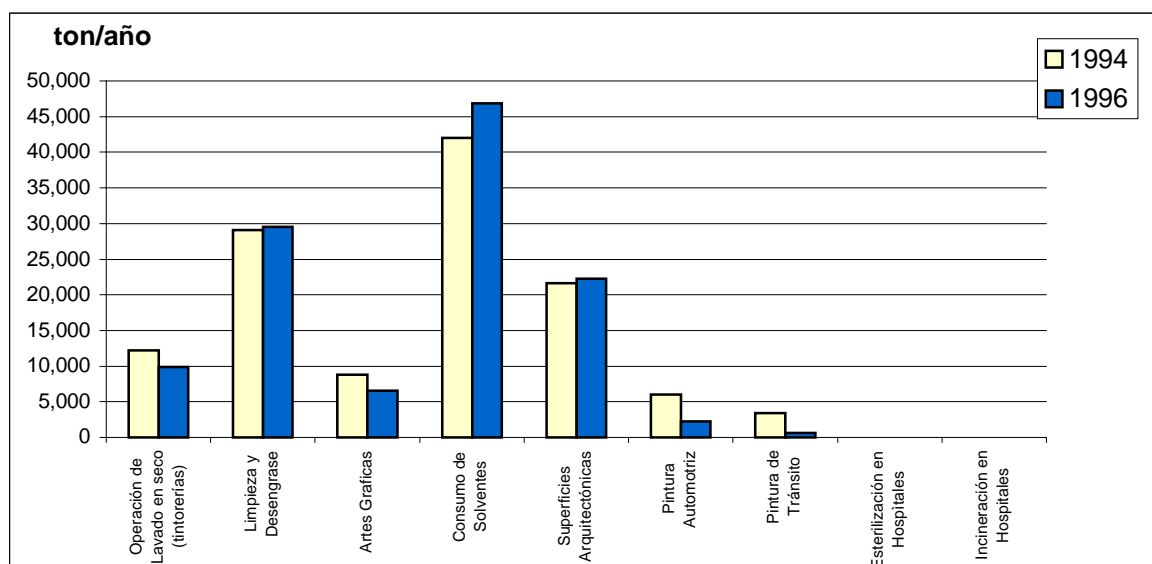


Evaporación de solventes por fuentes de área

Esta categoría contribuye con 141,439 toneladas anuales de hidrocarburos, que representa la mayor contribución de este contaminante generadas por las fuentes de área ubicadas en la ZMVM. En las emisiones originadas en cada una de las subcategorías se puede apreciar que el consumo de solventes presenta la mayor emisión anual de hidrocarburos con 46,856 ton/año (tabla 3.10).

En la gráfica 3.4 se muestra la comparación de las emisiones de esta categoría para los inventarios de 1994 y 1996.

Gráfica 3.4. Comparación de los inventarios de emisiones 1994 y 1996 para la categoría fuentes de evaporación



Las emisiones provenientes del lavado en seco, pintura automotriz y pintura de tránsito fueron calculadas con factores de emisión corregidos; ello repercutió de manera notable en la magnitud de las emisiones al compararse con el inventario de 1994, que se obtuvieron utilizando factores de emisión de EPA.

Fuentes evaporativas de hidrocarburos

La mayor contribución de hidrocarburos provenientes de la categoría fuentes evaporativas se origina por la distribución de gas L.P., cuya emisión fue de 76,414 ton/año.

Las emisiones generadas en los tiraderos a cielo abierto y los rellenos sanitarios se originan a partir de la descomposición de los desechos. Los residuos con alto contenido de celulosa generan una mayor cantidad de metano y pequeñas cantidades de otros hidrocarburos. La suma de las emisiones de estas dos

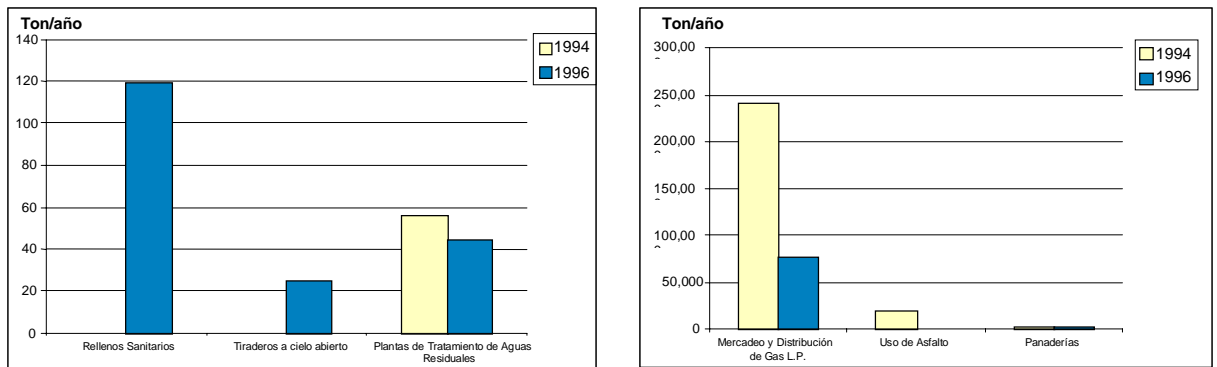
subcategorías alcanzan las 144 ton/año. Las emisiones de los rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto no fueron estimadas para el inventario de 1994.

Como se aprecia en la tabla 3.10, las emisiones provenientes por el uso de asfalto tienen una contribución anual de 100 ton/año de COV; durante el año de 1996 se empleó una cantidad menor de mezcla asfáltica, comparada con la de 1994.

Para el presente informe se consideraron 17 plantas de tratamiento de agua que generan 42 toneladas de hidrocarburos al año; las plantas incluyen tratamientos secundarios y terciarios de las aguas residuales. La emisión y el tipo de hidrocarburos que se emiten están relacionados con la composición del agua a tratar.

En la gráfica 3.5 se presentan las emisiones generadas por estas subcategorías para 1994 y 1996.

Gráfica 3.5. Comparación de los inventarios de emisiones 1994 y 1996 para la categoría fuentes evaporativas de COV.

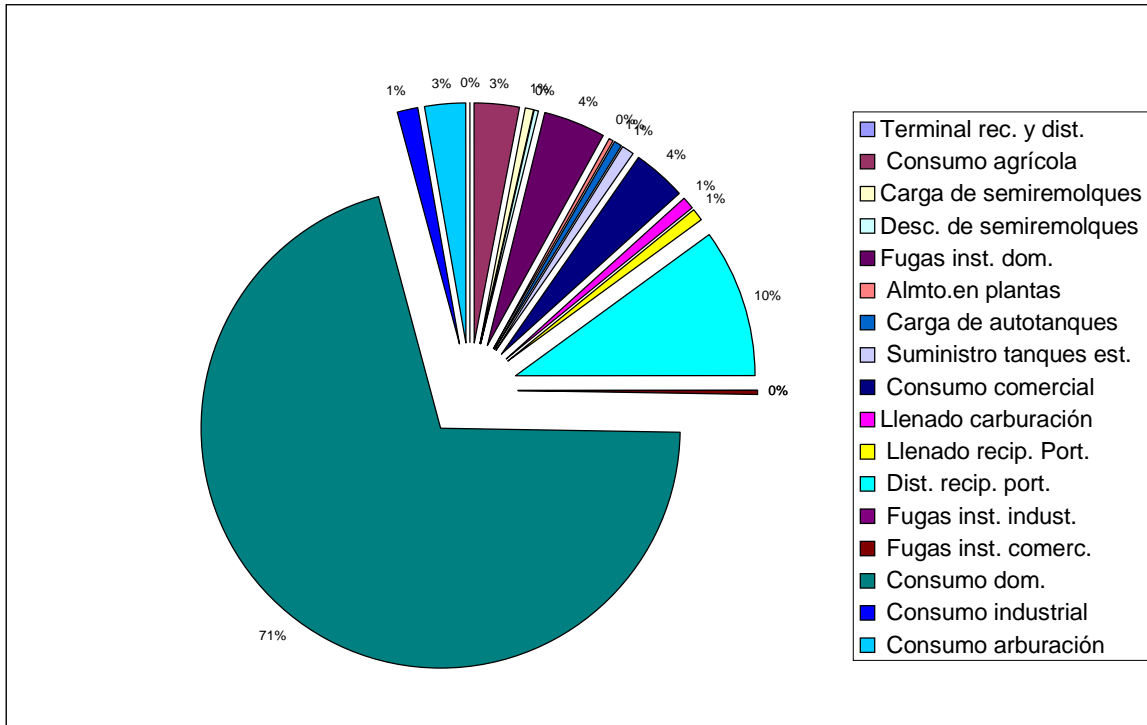


Las emisiones generadas por la distribución de gas L.P. durante 1994 fueron mayores a las reportadas en el presente inventario de 1996. Lo anterior se debe a que las emisiones de 1994 fueron resultado del cálculo de balance de materiales, mientras que para 1996 se tomaron del estudio realizado por Pemex-Gas y Petroquímica Básica¹⁸. Este estudio contempló la realización de pruebas en cámaras cerradas, así como trabajo en campo, midiendo principalmente las emisiones originadas durante las diferentes etapas de la comercialización y distribución del gas L.P.

El 71% de las emisiones de hidrocarburos proviene del consumo doméstico de gas L.P. y el 10% de la distribución de recipientes portátiles. Las fugas en instalaciones industriales, comerciales y domésticas contribuyen con el 4% y el 15% se emite durante en diferentes etapas de la distribución y uso del gas L.P. (ver gráfica 3.6).

¹⁸ Pemex-Gas y Petroquímica Básica (1997). *Op. cit.*

Gráfica 3.6. Contribución porcentual de las emisiones de hidrocarburos en la distribución de gas L.P.



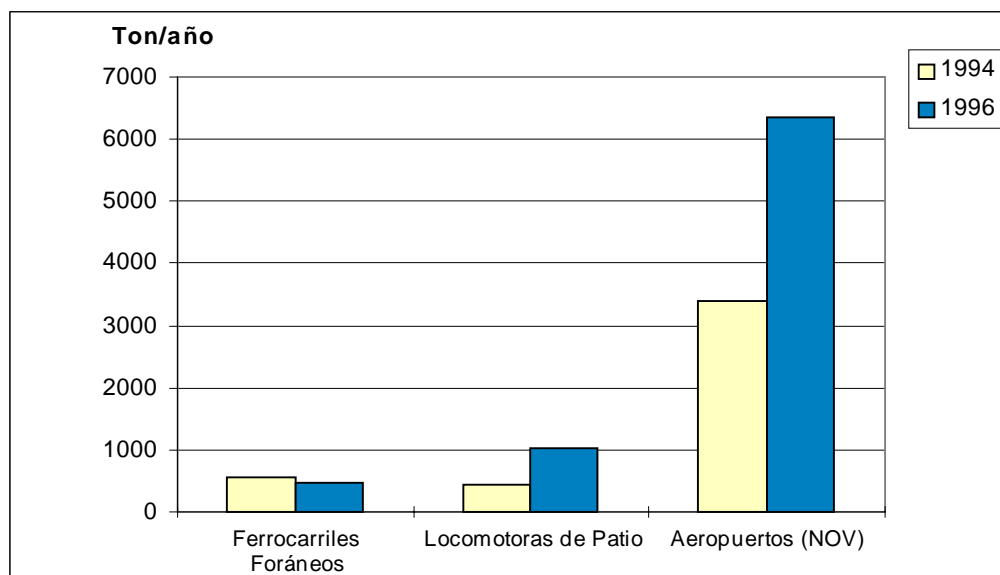
Fuente: Pemex Gas y Petroquímica Básica (1997). Efecto de los componentes del gas licuado de petróleo en la acumulación de ozono en la atmósfera de la ZMVM.

Fuentes móviles no carreteras

De las subcategorías que conforman las fuentes móviles no carreteras, las operaciones de aeronaves representan el mayor aporte de contaminantes con 6,358 ton/año. Por otro lado, las locomotoras foráneas y las locomotoras de patio emiten un total de 1,090 ton/año de COV. Las locomotoras de patio presentan una emisión mayor a las generadas por la subcategoría de locomotoras foráneas, debido a que las locomotoras de patio realizan todas sus operaciones dentro de la ZMVM, mientras que para las foráneas únicamente se contabilizan las emisiones que se originan durante su desplazamiento en la misma. Los valores obtenidos para este tipo de subcategorías son semejantes a los obtenidos a los de 1994 debido a que sus actividades no han sufrido cambios sustanciales en los últimos años.

Para el caso del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, a pesar de que los vuelos de carga fueron enviados al nuevo aeropuerto de la Ciudad de Toluca, las emisiones en 1996 superaron en casi el doble a las emisiones registradas en 1994, debido al incremento de las operaciones de vuelos comerciales (ver gráfica 3.7).

Gráfica 3.7. Comparación de los inventarios de emisiones 1994 y 1996 para la categoría fuentes móviles no carreteras



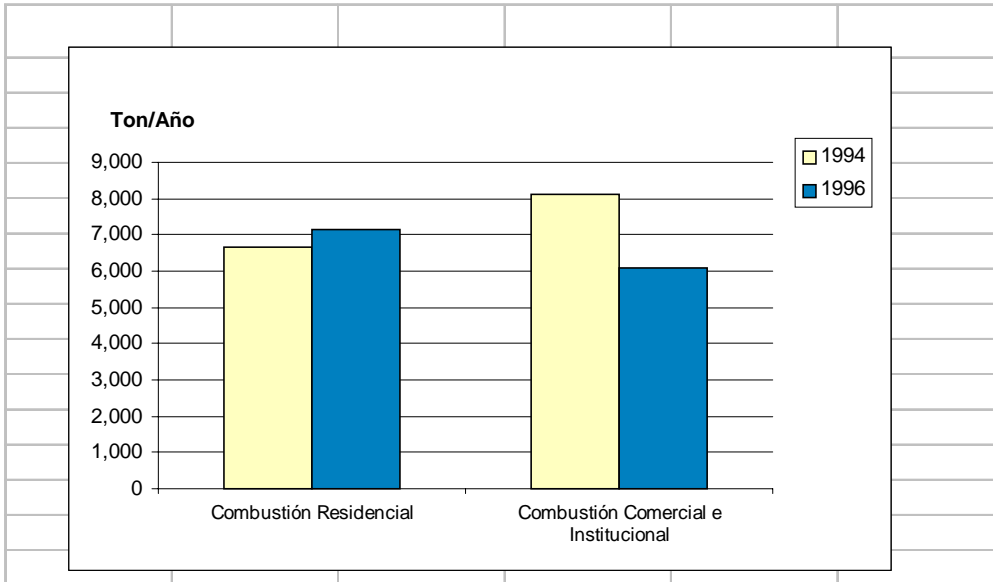
Nota: NOV (Número de operaciones de vuelo)

Fuentes de combustión

Las emisiones de hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono provenientes de la combustión en zonas habitacionales son más del doble de las estimadas para la combustión comercial e institucional. En el caso de las emisiones de óxidos de azufre, los comercios e instituciones generan 3,586 ton/año, que son mucho mayores en comparación con las de origen doméstico cuya emisión es menor a 1 ton/año. Lo anterior se debe a que en las zonas habitacionales los combustibles utilizados son el gas L.P. y el gas natural, mientras que en la combustión comercial e institucional, además de utilizar éstos combustibles, se consumen diesel y gasóleo con un contenido de azufre de hasta 1% en peso (ver Tabla 3.10).

En la gráfica 3.8 se observa que las emisiones habitacionales se incrementaron ligeramente en 1996, debido, entre otros factores, al crecimiento poblacional en el Valle de México. Asimismo, las emisiones generadas por las subcategorías combustión comercial e institucional disminuyeron, debido a que a partir de 1995 se dejó de vender queroseno en la Zona Metropolitana del Valle de México; combustible de menor calidad a los actualmente utilizados.

Gráfica 3.8. Comparación de las emisiones totales para la categoría fuentes de combustión de los inventarios de 1994 y 1996



4.- Inventario de Emisiones de Fuentes Vehiculares

I. Generales

La contaminación a la atmósfera originada por la circulación de los vehículos automotores en la ciudad, es hoy un problema serio y complejo, en donde intervienen en su generación los siguientes aspectos:

- λ El proceso de combustión, según la tecnología de los vehículos;
- λ El número de vehículos en circulación;
- λ La cantidad y tipo de combustibles utilizados;
- λ La velocidad de circulación;
- λ Las distancias de recorrido al día;
- λ El estado mecánico de los vehículos;
- λ Los tipos de vehículos que integran la flota vehicular;
- λ Los modos de circulación en la ciudad;
- λ La tasa de renovación de la flota vehicular.

Otros factores que intervienen en el régimen de las emisiones vehiculares son los económicos, que pueden acelerar o disminuir la renovación del parque, los factores urbanos que permiten una mayor o menor fluidez vial, así como los costos relacionados con la reparación y mantenimiento de los vehículos.

Estimaciones realizadas en la Ciudad de México durante la década de los años setenta, permitieron determinar que los vehículos de combustión interna contribuyeron con cerca del 50% de la emisión total de contaminantes a la atmósfera¹. Para 1994, el inventario de emisiones de fuentes móviles, el cual, consideró una flota vehicular de 2,720,000 vehículos (ver tabla 4.1), reveló que a menos de dos décadas el automóvil se había convertido en la principal fuente de contaminación del aire, contribuyendo con el 75% del total de los contaminantes emitidos en la atmósfera del Valle de México².

Tabla 4.1. Composición de la flota vehicular en circulación en la ZMVM en 1994

Tipo de vehículo	Número de unidades	Contribución (%)
Autos particulares	1,942,400	71.4
Pick Up	-	-
Taxis	145,800	5.4
Transporte de pasajeros	51,300	1.9
Transporte de carga	480,600	17.7
Otros	99,900	3.6
Total	2,720,000	100.0

1 Legorreta Jorge (1989). Transporte y Contaminación en la Ciudad de México, Ed. Centro de Ecodesarrollo.

2 Comisión Ambiental Metropolitana (1996). *Op. cit.*

Fuente: SEMARNAP-INE (1996). Primer Informe sobre la Calidad del Aire en Ciudades Mexicanas.

Los principales contaminantes emitidos por los vehículos automotores en circulación son: monóxido de carbono (CO), hidrocarburos totales (HCT), óxidos de nitrógeno (NOx), bióxido de azufre (SO₂) y partículas menores a 10 micrómetros (PM10), los cuales son resultado de los procesos de combustión interna incompleta realizados en los motores, así como de los procesos de evaporación del combustible utilizado.

El presente análisis actualiza el inventario de emisiones de origen vehicular de 1994 con información de 1996. Dicha actualización considera información reciente de la flota vehicular que circula en la ZMVM e integra los avances adquiridos en cuanto a los métodos de análisis estadísticos y los resultados obtenidos en los laboratorios de medición de emisiones vehiculares realizadas bajo condiciones controladas.

La articulación del sistema de transporte público y de carga forma parte de los principales elementos de la estructura urbana; su funcionamiento está condicionado tanto por los procesos de crecimiento demográfico y físico de ésta, como por los procesos económicos y sociales prevalecientes. El transporte en la ZMVM está íntimamente ligado al crecimiento urbano, favoreciendo con ello, el incremento del consumo de los diferentes tipos de combustibles. En las tablas 4.2 y 4.3 se muestra la evolución del consumo de los combustibles vehiculares y el contenido de azufre en la gasolina y diesel empleados en la ZMVM.

Tabla 4.2. Venta anual de combustibles vehiculares en la ZMVM

PRODUCTO	1994 (m ³)	1995 (m ³)	1996 (m ³)
Gasolina NOVA	4,060,513	3,573,819	3,043,770
Gasolina MAGNA-SIN	2,616,817	2,817,117	3,198,190
Gasolina Premium	0	0	5,020
Diesel-Sin	1,179,543	1,132,529	1,203,900

Fuente: Pemex-Refinación.

Tabla 4.3. Contenido de azufre en la gasolina y diesel utilizados en la ZMVM

Característica	NOVA	MAGNA-SIN	PEMEX-MAGNA	PREMIUM	DIESEL
Azufre (% peso)	0.073	0.048	0.050	0.017	0.050

Fuente: Pemex-Refinación, 1996.

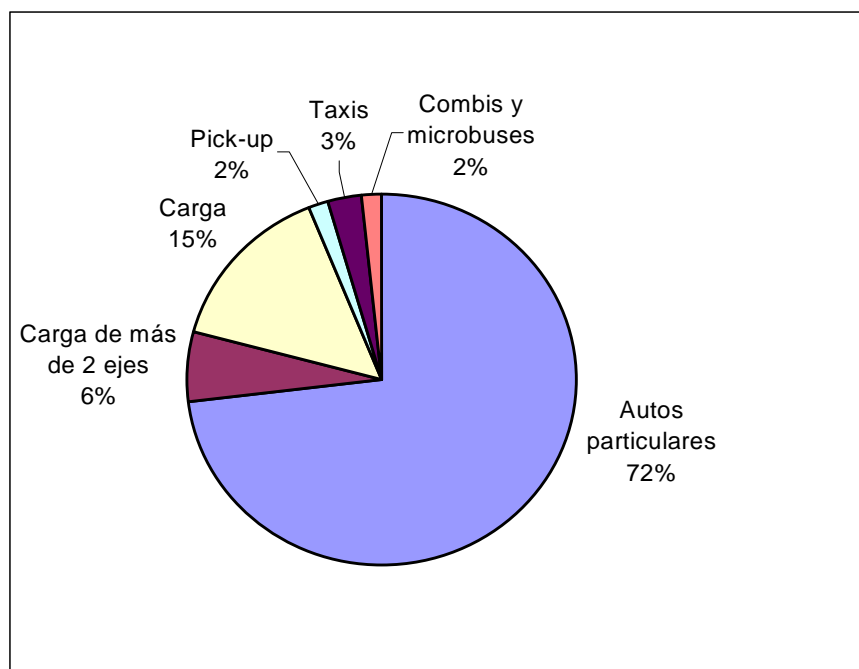
El número de vehículos considerado en el presente inventario de es 3,157,874 unidades, esta información fue proporcionada por la Comisión Metropolitana de

Transporte y Vialidad (COMETRAVI)³. En la tabla 4.4 y la gráfica 4.1, se muestra la distribución por categoría y el porcentaje de distribución de esta flota vehicular.

Tabla 4.4. Distribución del parque vehicular en circulación en 1996.

Tipo de Vehículo	Número de Unidades	%
Automóviles Particulares	2,301,445	72
Taxis	91,765	3
Combis y Microbuses	52,158	2
Pick-up	48,507	2
Camiones de Carga	463,962	15
RUTA-100	2,794	<1
Autobuses	5,297	<1
Carga de más de dos ejes	191,946	6
TOTAL	3,157,874	100

Gráfica 4.1. distribución porcentual del parque vehicular en circulación en 1996



Nota: Autobuses y R-100 representan menos del 1% de las unidades.

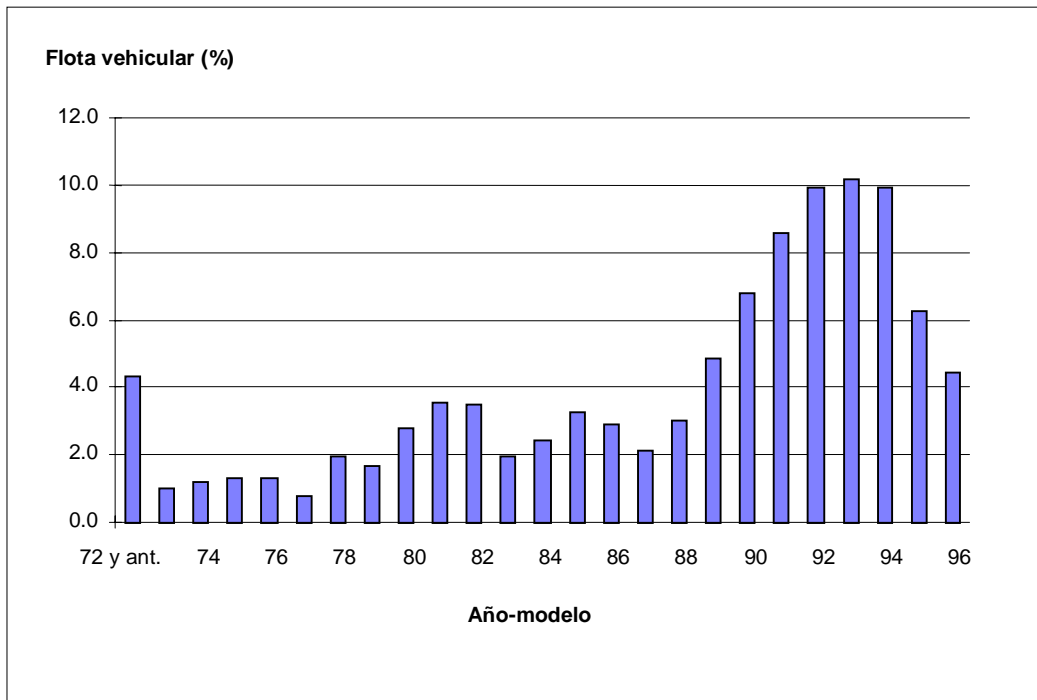
Como se puede observar, una de las diferencias más marcada de este parque vehicular con respecto al de 1994, es el número de taxis que mostró una disminución del orden 50% en este lapso de tiempo.

³ COMETRAVI (1997). Estrategia Integral del Transporte y Calidad del Aire para la ZMVM. Estudio 5: Definición de políticas de modernización, inspección, sustitución, eliminación definitiva, adaptación de vehículos de transporte y combustibles alternos.

II. Metodología

Con el fin de estimar la distribución de la flota vehicular por año-modelo, se realizó una distribución estadística con base en una muestra de 1.5 millones de vehículos que cumplieron con el *Programa de verificación vehicular* durante el primer semestre de 1997⁴. Dicha distribución se muestra en la gráfica 4.2, en donde se aprecia que los vehículos modelo 1993 y posteriores representan alrededor del 30% del parque vehicular, mientras que los vehículos con una edad mayor a 15 años representan aproximadamente el 15% de este parque.

Figura 4.2. Distribución vehicular por año en circulación en la ZMVM en 1996



La distribución por año modelo consideró una muestra vehicular de cerca de 1,500,000 unidades.

Las emisiones reportadas en el presente inventario corresponden a hidrocarburos totales (HCT), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), bióxido de azufre (SO₂) y partículas menores a 10 micrómetros (PM10). La estimación de las PM10 se agrega al actual inventario en sustitución del cálculo de las partículas totales, ya que estudios realizados indican que el 98% de las partículas emitidas por el escape de los vehículos a diesel y gasolina son de tamaños menores a 10 micrómetros^{5,6}.

⁴ Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Dirección de Gestión de la Calidad del Aire.

⁵ Environmental Protection Agency (1985). Emissions Characterization of Heavy-Duty Diesel and Gasoline Engines and Vehicles. EPA 460/3-85-001.

⁶ Environmental Protection Agency (1979). Characterization of Gaseous and Particulate Emissions from Light Duty Diesels Operated on Various Fuels. EPA-460/3-79-008, Ann Arbor, MI Emissions Control Technology Div.

Para la estimación de las emisiones de origen vehicular se consideran dos elementos fundamentales que reflejan la actividad vehicular: la distancia, la forma en la cual ésta fue recorrida (dato de actividad) y la tasa promedio de contaminantes emitidos durante el transcurso del viaje (factor de emisión). Ambos elementos reflejan un patrón complejo que se da bajo circunstancias particulares del uso del automóvil. Normalmente, la actividad vehicular se expresa en términos del kilometraje recorrido por los vehículos y los factores de emisión se expresan en unidades de gramos de contaminante emitido por kilómetro recorrido.

El dato de actividad representativo de una zona de estudio, puede ser estimado mediante la contabilización del número de vehículos que pasan por una calle, avenida o carretera de longitud conocida. La información utilizada en el inventario actual consideró los datos recopilados por la Comisión Metropolitana de Transporte y Vialidad referidos en el estudio denominado *Estrategia Integral de Transporte*⁷.

La estimación de los factores de emisión se realizó siguiendo la metodología desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos de Norteamérica, quien ha desarrollado modelos de factores de emisión, diseñados para considerar los efectos de numerosos parámetros vehiculares que influyen en la determinación del volumen total de contaminantes emitidos por los vehículos.

Los factores de emisión de HCT, CO y NOx empleados en el inventario de emisiones de 1994 para la ZMVM fueron obtenidos a través de la aplicación del modelo MOBILE4.3⁸ adaptado para la Ciudad de México. En 1996, los factores de emisión de estos contaminantes fueron determinados mediante el modelo MOBILE5 en su versión para México, conocido como el modelo M5MCMA.a3, desarrollado por RADIANT International⁹. Esta versión del modelo, incorpora adicionalmente información relacionada con las emisiones evaporativas, obtenida en pruebas de laboratorio.

Para el cálculo de los factores de emisión se consideraron las siguientes condiciones de modelación:

- λ Distribución vehicular por año-modelo;
- λ Kilometraje promedio anual recorrido por tipo de vehículo;
- λ Temperatura ambiente;
- λ Velocidad promedio de circulación;
- λ Presión de Vapor Reid (PVR);
- λ Altitud.

Uno de los aspectos importantes que se consideraron en el presente inventario fue la homologación entre la clasificación de la flota vehicular que circula en la

⁷ COMETRAVI (1997). *Op. cit.*

⁸ Environmental Protection Agency (1994). FALTA ACOMPLETAR

⁹ . DDF-RADIANT (1996). Manual de factores de emisión para fuentes móviles M5MCMA.a3

ZMVM y la establecida por el modelo M5MCMA.a3, la cual se llevó a cabo considerando el peso vehicular y los límites de emisión permisibles vigentes para esta zona. La tabla 4.5 muestra dicha homologación.

Tabla 4.5. Homologación de la clasificación vehicular

Categoría de vehículo utilizado en el modelo M5MCMA.a3	Correspondencia con la clasificación del Programa de Verificación
Ligth Duty Gasoline Vehicles (LDGV)	autos particulares y taxis a gasolina
Ligth Duty Gasoline Trucks 1 (LDGT1)	pick-up a gasolina
Ligth Duty Gasoline Trucks 2 (LDGT2)	Combis, microbuses, y carga a gasolina
Heavy Duty Gasoline Vehicles (HDGV)	Camionetas de carga a gasolina
Ligth Duty Diesel Vehicles (LDDV)	Vehículos particulares a diesel
Ligth Duty Diesel Trucks (LDDT)	Camionetas de carga a diesel
Heavy Duty Diesel Vehicles (HDDV)	Autobuses, autobuses urbanos (Ruta - 100), carga de más de dos ejes
Motorcycles (MC)	Motocicletas

Fuente: SEMARNAP Y RADIAN (1997). Mexico Emissions Inventory Program Manuals. Vol. VI Mobile Sources.

En el caso particular de las PM10, se consideraron los factores de emisión reportados en el estudio *Measurement of Exhaust Particulate Matter Emissions from In-Use Ligth-Duty Motor Vehicles in the Denver, Colorado Area*¹⁰, mientras que en el caso del bióxido de azufre, los factores de emisión se obtuvieron a través de la metodología propuesta por el modelo PART5, considerando el contenido de azufre de las gasolinas y del diesel que se vende en la Zona Metropolitana del Valle de México.

En la Tabla 4.6, se detallan los factores de emisión por contaminante y tipo de vehículo considerados en el presente estudio.

Tabla 4.6. Factores de emisión (gr/km)

Clasificación Vehicular	HCT	CO	NOx	PM10 **	SO ₂ *
Autos Particulares	2.92	34.60	1.38	0.029	0.0907
Taxis	2.92	34.60	1.38	0.029	0.0907

¹⁰ Coordinating Research Council (1998). Measurement of Exhaust Particulate Matter Emissions from In-Use Light-Duty Motor Vehicles in the Denver, Colorado Area. Final Report CRC Project E-24-1.

Combis y Micros	7.78	85.14	2.65	0.029	0.1150
Pick-up	4.62	54.45	2.01	0.029	0.1194
Camiones de Carga	7.78	85.14	2.65	0.029	0.2067
RUTA-100	4.85	11.70	14.57	1.500	0.2225
Autobuses	4.85	11.70	14.57	1.500	0.3157
Carga de más de 2 ejes	4.85	11.70	14.57	1.500	0.2672

Los factores se estimaron considerando una velocidad promedio de 36 km/hr.

* Los factores de emisión consideran el contenido de azufre y el volumen de consumo de gasolinas y diesel.

** Factores de emisión tomados del estudio "Measurement of Exhaust Particulate Matter Emissions from In-Use Light-Duty Motor Vehicles in the Denver, Colorado Area".

Como se mencionó con anterioridad, el dato de actividad (kilometraje recorrido por día) es uno de los elementos fundamentales en el proceso de estimación de las emisiones totales, reflejando la intensidad con la cual son empleados cada tipo de vehículos. En la tabla 4.4 se presentan los valores utilizados en el presente inventario.

Tabla 4.4. Promedio de kilometraje recorrido por día

Clasificación vehicular	Recorrido promedio (km/día)
Autos Particulares	33
Taxis	200
Combis y Micros	150
Pick-up	40
Camiones de Carga	50
RUTA-100	150
Autobuses	150
Carga de más de dos ejes	70

Fuente: COMETRAVI (1997). Estrategia Integral del Transporte y Calidad del Aire para la ZMVM. Estudio 5: Definición de políticas de modernización, inspección, sustitución, eliminación definitiva, adaptación de vehículos de transporte y combustibles alternos.

III. Resultados

El resultado de la aplicación de los factores de emisión y el dato de actividad se muestran en la tabla 4.5. que presenta las emisiones estimadas del parque vehicular de 1996. Es importante señalar que la emisión anual se estimó considerando que el número promedio de días de circulación vehicular es de 313 días al año. Como se puede observar el total de emisiones generadas por los vehículos automotores que circulan en la ZMVM es de alrededor de 2,270,000 toneladas anuales, de las cuales el 8.2 %, 85 % y el 6 % son emisiones de HCT, CO y NOx, respectivamente. Por otro lado las emisiones de PM10 y SO₂ no exceden el 1 %.

Tabla 4.5. Emisión de contaminantes de origen vehicular en la ZMVM en 1996 (ton/año)

Clasificación Vehicular	HCT	CO	NOx	PM-10	SO ₂
-------------------------	-----	----	-----	-------	-----------------

Inventario de Emisiones de Fuentes Vehiculares

Autos Particulares	69,413	822,498	32,805	689	2,155
Taxis	16,774	198,759	7,927	167	521
Combis y Micros	19,052	208,492	6,489	71	282
Pick-up	2,806	33,068	1,221	18	73
Camiones de Carga	56,491	618,202	19,242	211	1,501
RUTA-100	636	1,535	1,911	197	29
Autobuses	1,206	2,910	3,623	373	79
Carga de más de dos ejes	20,397	49,205	61,275	6,308	1,124
TOTAL	186,774	1,934,669	134,493	8,033	5,762

Por la importancia que representan los HC y NOx en la formación de ozono, destacan la contribución a las emisiones de estos contaminantes, los de autos particulares y los camiones de carga, así como los de taxis, combis y micros, ya que a pesar de representar únicamente el 3% de la flota vehicular, sus emisiones son del orden de la cantidad de los autos particulares. Con relación a las emisiones de PM10, sobresale la contribución de los vehículos a diesel y en particular la de carga de más de dos ejes; es también significativo la contribución de los autos particulares por su gran número.

5. Fuentes Naturales

5.1. Emisiones biogénicas

I. Generalidades

A diferencia de las emisiones industriales y vehiculares, sólo recientemente las emisiones biogénicas en la ZMVM empiezan a ser consideradas como una fuente significativa de emisión de hidrocarburos. A la fecha, los esfuerzos conocidos son una estimación con propósitos de modelación realizada por el Instituto Mexicano del Petróleo en 1992¹, los trabajos desarrollados con el modelo BEIS² y el trabajo elaborado por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM para el Consejo de Estudios para la Restauración y Valoración Ambiental^{3, 4, 5 y 6}.

En otros países se ha reconocido que del total de las emisiones de COV generadas, las fuentes biogénicas contribuyen hasta con cerca del 20%, que además, por el tipo de compuestos que emiten, éstos participan en la formación de ozono en las zonas urbanas, en presencia de óxidos de nitrógeno y luz solar.

La Zona Metropolitana del Valle de México está localizada a una altitud promedio de 2,240 metros sobre el nivel medio del mar y está rodeada al sur y al poniente por una cadena montañosa que impide el flujo de viento predominante en la zona, que es de noreste a suroeste. Como resultado, gran parte del tiempo la masa de aire que contiene los contaminantes gaseosos, producto de las actividades ciudadanas, alcanza la zona montañosa y regresa a la parte sur de la Ciudad, que es la que sufre muchas veces episodios por ozono debido a transporte de contaminantes⁷.

II. Metodología

La actualización del inventario de las emisiones biogénicas de 1994, se llevó a cabo mediante la utilización del modelo BEIS2 (siglas en inglés de *Biogenic Emissions Inventory System*⁸), que incluye una base de factores de emisión para 60 géneros de

¹ IMP-Laboratorio Nacional de Los Alamos (1994). The Mexico City Air Quality Research Initiative Technical Report.

² Cruz-Nuñez, X., M.V. Alegre-González y L.A. Castellanos-Fajardo (1995). Biogenic Emissions Inventory for Mexico City and the State of México. The Emission Inventory: Programs and Progress. Air and Waste Management Association., Pittsburgh PA, EUA.

³ Ruiz-Suárez, L.G., Imaz-Gispert M., Montero, M., O. Sánchez, F. Hernández-Galicia, C. Conde and T. Castro (1994). Cálculos y Mediciones de Hidrocarburos Naturales en el Valle de México. Reporte técnico para el Departamento del Distrito Federal, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México.

⁴ Imaz-Gispert (1995). M. Medición de la Emisión de Isopreno y Monoterpenos en Cinco Razas de Maíz. Tesis de Maestría en Ciencias, Facultad de Ciencias, UNAM, México.

⁵ Lamb, B., A Guenter, D. Gay and H. Westberg (1987). Atmospheric Environment 21, p.1695. Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution. National Research Council, National Academy Press, Washington, EUA.

⁶ National Research Council (1991). Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution. National Research Council, National Academy Press, Washington, EUA.

⁷ IMP-Los Alamos (1994). *Op. cit*

⁸ Environmental Protection Agency (1995). User's Guide to the Personal Computer Version of the Biogenic Emissions Inventory System (PC-BEIS2). EPA-600/R-95-091.

árboles. BEIS2 permite estimar las emisiones de isopreno, monoterpeno y otros compuestos orgánicos volátiles originados en la vegetación; además de óxidos de nitrógeno provenientes de la actividad de los suelos. La temperatura de las hojas y la radiación solar, que es activamente fotosintética, se derivan de las condiciones ambientales y se usan en las ecuaciones empíricas para la estimación de las tasas de emisión de los compuestos orgánicos volátiles de cada género vegetal de manera vertical a lo largo del dosel. BEIS2 aplica correcciones para la luz y la temperatura. Adicionalmente, para el presente inventario el modelo BEIS2 fue modificado para considerar la altitud y presión de la ZMVM.

El modelo se aplicó a un dominio espacial que cubre el 90% del Estado de México y la totalidad del Distrito Federal. La resolución de la cobertura vegetal en dicho dominio es de 220 km² distribuidos en celdas de 10 x 10 kilómetros; esta área se consideró para la estimación de COV y se presenta en la Figura 5.1. Asimismo, en esta misma figura se muestra, con un área sombreada, el dominio considerado para la estimación de las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Se establecieron los diferentes tipos de vegetación mediante un plano obtenido de imágenes de satélite, publicado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y el Instituto de Geografía de la UNAM⁹ para el intervalo anual 1993-1995. Cabe mencionar que la distribución de la vegetación en la ZMVM se presenta en áreas relativamente concentradas; así, la vegetación forestal se encuentra principalmente en la zona montañosa, mientras que las especies agrícolas se distribuyen en los alrededores de la Ciudad de México, principalmente hacia el noreste.

Los usos de suelo y las especies vegetales que se incorporaron en el modelo para la estimación de las emisiones biogénicas son las siguientes:

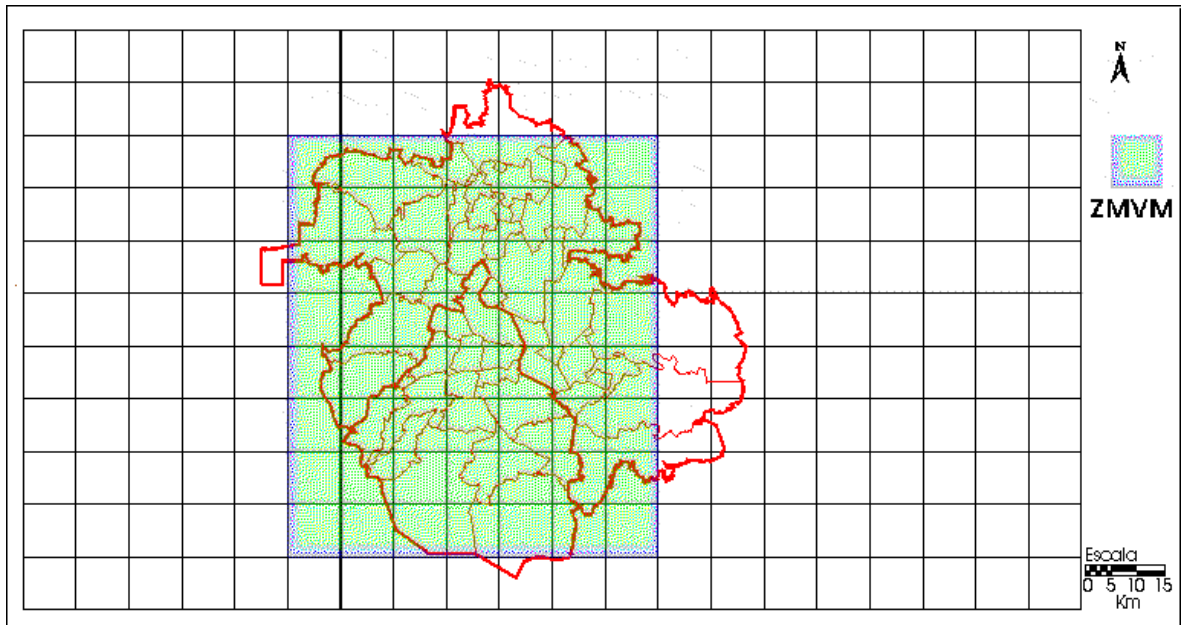
- λ Especies agrícolas: alfalfa, avena, maíz y trigo;
- λ Especies forestales: encino, pino, coníferas y bosque mixto;
- λ Vegetación urbana: arbustos y mezcla pasto/bosque;
- λ Cuerpos de agua;
- λ Superficie urbana.

Para la realización de las estimaciones biogénicas, se consideraron tres escenarios meteorológicos, que incorporan los datos promedio de las tres estaciones que se observan en el valle de México, a saber:

- λ *Estación seca-caliente (sc)*, comprende de marzo a mayo;
- λ *Estación de lluvias (ll)*, comprende de junio a octubre;
- λ *Estación seca-fría (sf)*, comprende de noviembre a febrero.

⁹ Carta Forestal 1:250,000 Ciudad de México E 14-2. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos e Instituto de Geografía, UNAM.

Figura 5.1. Área de estudio

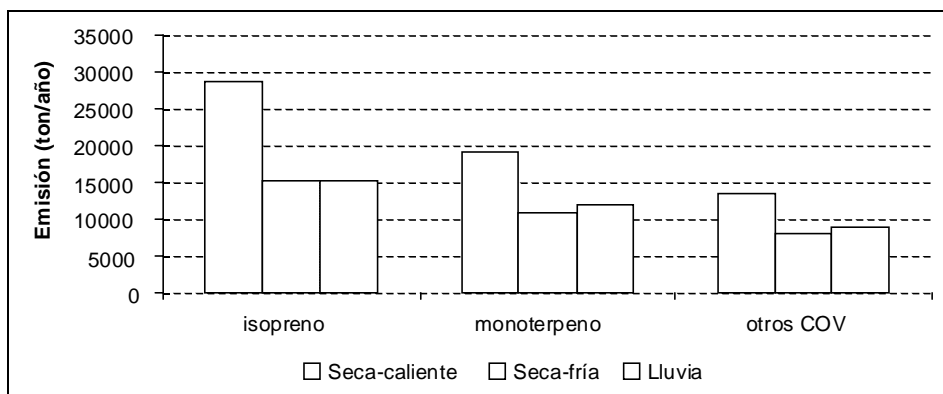


III. Resultados

Compuestos orgánicos volátiles

Las emisiones biogénicas totales obtenidas a través del modelo BEIS2 fueron del orden de los 131 mil toneladas anuales; los valores más altos de las emisiones biogénicas totales se obtienen para el isopreno, seguido del monoterpeno y de los demás compuestos orgánicos volátiles (COV), ver la gráfica 5.1.

Gráfica 5.1. Emisiones biogénicas totales



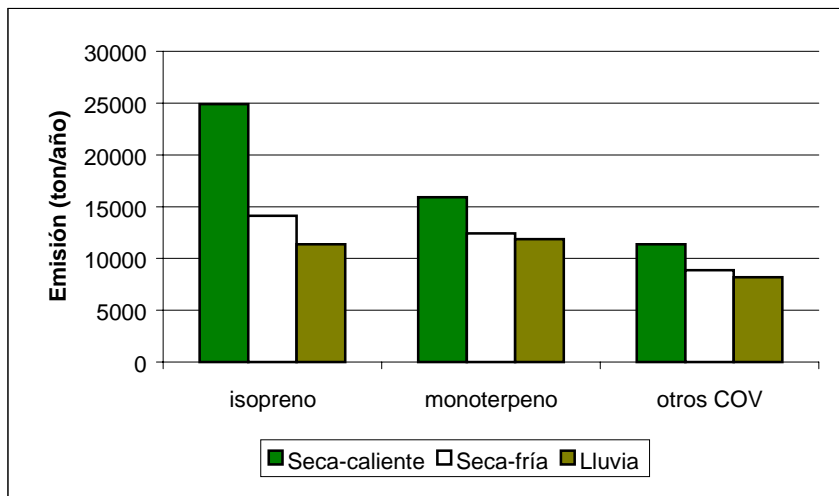
En la tabla 5.1 se muestran las emisiones totales por estación; en ella se observa que, de los tres escenarios modelados, la estación seca-caliente presenta una mayor cantidad de emisiones, seguida del escenario de lluvia y el de la estación seca-fría.

Tabla 5.1. Comparación entre las emisiones biogénicas de hidrocarburos totales por estación climática (ton/año)

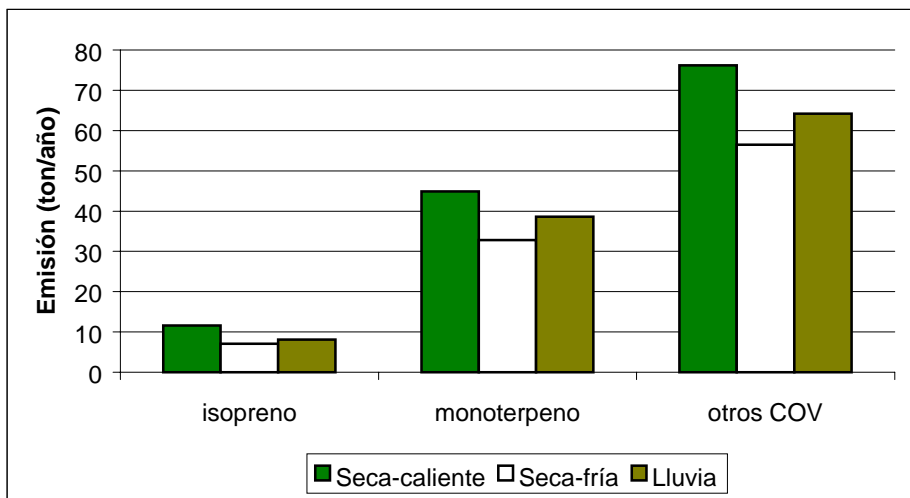
Estación	Seca-caliente	Lluvias	Seca- fría	Total
Emisión	61,272	35,820	33,985	131,077

Las especies forestales, principalmente coníferas, generan como parte de sus emisiones una gran proporción de isopreno. Por su parte, las especies no forestales generan emisiones en las que las proporciones de los diferentes compuestos orgánicos volátiles varían en función de la especie. En la malla de modelación se tomaron las contribuciones provenientes de las especies forestales y especies agrícolas por separado. Los resultados obtenidos por especies forestales y agrícolas se presentan en las gráficas 5.2 y 5.3. En éstas se resalta la mayor proporción de emisiones provenientes de las especies forestales con respecto a las agrícolas, por varios órdenes de magnitud.

Gráfica 5.2. Emisiones totales provenientes de las especies forestales



Gráfica 5.3. Emisiones totales provenientes de las especies agrícolas.



Como se mencionó, el total de emisiones de compuestos orgánicos volátiles estimado en 1996 asciende a 131,077 ton/año, mientras que para 1994 se estimó una emisión de 38,909 ton/año. Estas cifras no son comparables ya que en el inventario de 1994 se consideró únicamente una época del año, mientras que en el inventario de 1996 se consideraron tres estaciones climáticas y una mayor área de estudio.

Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) se producen en el suelo como resultado de los procesos microbianos de nitrificación y desnitrificación y por algunos mecanismos químicos que involucran a los nitritos. La mayoría de óxidos de nitrógeno que provienen del suelo se emiten en forma de óxido nitroso, el cual se transforma en bióxido de nitrógeno (NO₂), participando en la formación de ozono en una atmósfera fotoquímicamente reactiva¹⁰.

Las emisiones de NO_x provenientes del suelo no fueron evaluadas en el inventario de 1994 por lo que éste es el primer reporte de tales emisiones. De acuerdo con los resultados de la aplicación del modelo BEIS2, las emisiones de NO_x fueron durante 1996, de 443 toneladas anuales en la estación seca-caliente, de 422 ton/año en la estación de lluvia y de 414 ton/año en la estación seca-fría, dando en conjunto un total de 1996 1,279 ton/año.

vegetal de los suelos. Se han propuesto otros factores, como la intensidad del tráfico sobre suelos no pavimentados, como elementos generadores de material particulado¹¹.

¹⁰ EPA-RADIAN (1996). Biogenic Sources Preferred Methods. Emission Inventory Improvement Program. Vol. V.

¹¹ Romero, S., J.M. Ramos, M. Orea y M. Rivas (1997). L'effet de la croissance périphérique urbaine et le transport des travailleurs: facteur d'émission de particules (PM₁₀) à l'atmosphère métropolitaine de Mexico 4ème Colloque Scientifique International Transports et Pollution de l'Air 1997. Avignon, France.

Anexo I

Estimación de la emisiones por la fabricación de tabique rojo y la operación de bancos de materiales pétreos

De manera preliminar se describe la aplicación de una metodología empleada para el cálculo de las emisiones provenientes de la fabricación artesanal de tabique rojo y la extracción de materiales pétreos.

En la fabricación artesanal de tabique rojo se consideraron 478 hornos, todos ellos asentados en los municipios conurbados de la ZMVM. Los combustibles utilizados en estos hornos son principalmente aserrín, aceite quemado, combustóleo y llantas. Los cálculos incluyen la fase de cocción del tabique y no toman en cuenta la elaboración del bloque del tabique crudo. Se supuso una capacidad promedio de producción de 50,000 tabiques por horno y que cada horno es encendido una vez al mes. Los factores de emisión fueron obtenidos del documento SCC/98 de la EPA¹⁶, y corresponden a calderas comerciales de combustión externa de madera y aserrín (tabla 1).

Tabla 1. Factores de emisión para la fabricación de tabique rojo (kg/ton de tabique producido)

Combustible	PT	PM10	SOx	NOx	COV's	CO
Aserrín	23.52	8.41	0.08	1.40	0.70	2.00
Aceite	1.20	0.78	19.02	6.60	0.14	0.60
Llantas	0	0.5897	1.3044	2.6088	0.7744	2.00

Fuente: Source Classification Codes (1998), Calderas Comerciales de Combustión Externa para Madera y Aserrín. 1000-3000/1-02009-01/Caldera quemado de aserrín.

Environmental Protection Agency (1997). 500/R-97-115, Emisiones al Aire por Combustión de Aceites y Combustóleo

Environmental Protection Agency (1997). 600/R-97-115, Emisiones al aire por Combustión de Llantas.

En la subcategoría de bancos de materiales pétreos se contemplaron las actividades de extracción de arena, grava y cantera. Se consideró una cantidad de 8,028,700 m³ de material extraído al año y los factores de emisión se tomaron del AP-42¹⁷.

Tabla 2. Factores de emisión para la extracción de materiales pétreos (kg/ton de material extraído)

Actividad	PT	PM10
Transferencia y transporte de material	0.01	
Apilador	0.07	0.03
Cribado		0.06

¹⁶ Environmental Protection Agency (1998). Standard Classification Code/ External Combustion/ 1000-3000/1-02-009-01.

¹⁷ EPA (1992). *Op. cit.*

Fuente: Environmental Protection Agency (1997). AP-42-92. Explotación de Minas de Arena y Cantera, Minerales No Metálicos - 1400.

Resultados

Las categorías de fabricación de tabique rojo y extracción de bancos de materiales son reportadas por primera ocasión de manera preliminar en el inventario de emisiones. Los resultados de ambas subcategorías se muestran en la tabla 3.

El contaminante que más se emite durante la fabricación artesanal de tabique rojo son las partículas totales y PM10, las cuales se originan principalmente por los tipos de combustibles utilizados.

Tabla 3. Datos preliminares de bancos de material y fabricación de tabique rojo (ton/año)

	Partículas	PM10	SO₂	CO	NOx	HC
Fabricación artesanal de tabique rojo	856	308	84	75	79	26
Extracción en bancos de materiales	1,205	1,214				2,419